



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VLIV DYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA KONTAKTNÍ
ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY LOŽISKOVÉHO
MATERIÁLU**

INFLUENCE OF DYNAMIC LOADING ON THE CONTACT FATIGUE CHARACTERISTICS OF BEARING
MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Hložek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jiří Hložek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv dynamického zatěžování na kontaktní únavové charakteristiky ložiskového materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Většina ložisek není v běžném provozu vystavena monotonnímu zatěžování. Reálné zatížení zahrnuje dynamické účinky, jejichž charakter se liší podle druhu aplikace. Dynamické vlivy rozhodujícím způsobem ovlivňují trvanlivost a provozuschopnost ložisek. Pro zlepšení kvalitativního odhadu reálné trvanlivosti ložisek je nutné provést rozbor spektra zatěžování a výsledky této studie zahrnout do laboratorních zkoušek cyklicky zatěžovaných materiálů.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Stanovení souvislosti mezi časově proměnným zatěžováním a výslednými únavovými vlastnostmi vybraného materiálu při kontaktním zatěžování pomocí kritického rozboru experimentálně získaných dat.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout metodiku experimentů s dynamickou změnou zatížení,
- návrh a realizace modernizace stávajícího zkušebního zařízení Axmat,
- ověření funkčnosti inovované stanice s aplikací moderní diagnostiky,
- provedení a vyhodnocení souboru měření na vybraném materiálu,
- zobecnění vlivu změn dynamických parametrů na trvanlivost.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika. 1. vydání, BEN - technická literatura, Praha 2006, 408 s, ISBN 978-80-7300-158-6.

BOUKHAROUBA, T., ELBOUJDANI, M., PLUVINAGE, G.: Damage and Fracture Mechanics Failure Analysis of Engineering Materials and Structures. 1. vydání. Springer Science + Business Media B.V., Berlin 2009, 608 s., ISBN: 978-90-481-2668-2.

SKF GROUP. Rolling bearings: SKF bearings, 2012, 1363 s. ISBN 978-91-978966-4-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem skokových změn při modelových zkouškách standardní ložiskové oceli 100Cr6. Je zde popsána navržená metodika experimentů se skokovou změnou zatížení, která je posléze aplikována na skutečná měření. V této práci byly provedeny tři kompletní série experimentů, u kterých byla stanovena základní trvanlivost pro každý trend zatěžování. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že zvolená ocel je schopna snášet skokové změny zatížení, i přes to že není ideálním zástupcem pro tento druh zatěžování. Součástí práce bylo ověření funkčnosti inovovaných zkušebních stanic AXMAT s moderní diagnostikou a novým řídicím systémem, a také provedeno zprovoznění hydraulické varianty AXMAT, která umožňuje vzdáleně vyvozovat dynamické zatěžování zkušebního vzorku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ocel 100Cr6, kontaktní únava, dynamické zatěžování, akustická emise, AXMAT

ABSTRACT

This thesis deals with the study of sudden step changes observed in model testing of standard bearing steel 100Cr6. Methodology of experiments with step change of load is proposed and applied in measurements. Three complete series of experiments were conducted, and rating life was determined for each loading trend. Based on the experiments carried out, it was found that the selected steel is able to withstand the sudden step of load changes, despite the fact that it is not material of choice for this type of load. Part of this work was to verify functionality of the innovated test stations AXMAT with modern diagnostics and a new control system, and also of the hydraulic variant of AXMAT, which allows to remotely derive dynamic loading of the test sample.

KEYWORDS

Steel 100Cr6, contact fatigue, dynamic load, acoustic emission, AXMAT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLOŽEK, Jiří. *Vliv dynamického zatěžování na kontaktní únavové charakteristiky ložiskového materiálu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117383>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Pavel Mazal.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc za jeho cenné rady, připomínky a odborné vedení při psaní této diplomové práce. Také bych rád poděkoval Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. za rady a pomoc ohledně akustické emise a také Ing. Liboru Nohálovi, Ph.D. za obeznámení problematiky ohledně ložiskových materiálů a jejich testování.

Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia a především při psaní této závěrečné práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne:

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Terminologie ložisek	16
2.2	Základní ložiskové parametry	16
2.2.1	Základní dynamická únosnost	16
2.2.2	Základní statická únosnost	17
2.2.3	Životnost ložisek	17
2.2.4	Trvanlivost ložisek	17
2.3	Únava materiálu	19
2.3.1	Kontaktní únava	19
2.3.2	Dynamicky zatěžovaná ložiska	19
2.3.3	Proměnlivě zatěžovaná ložiska	20
2.4	Experimentální zařízení pro zkoušky trvanlivosti ložiskových materiálů	25
2.5	Metoda akustické emise	27
2.5.1	Prvky aparatury akustické emise	27
2.5.2	Signál akustické emise	29
2.5.3	Měření akustickou emisí	30
2.5.4	Monitorování ložisek pomocí metody akustické emise	30
2.5.5	Využití metody akustické emise k určení poškození axiálních ložisek nebo jejich částí	33
2.6	Další metody diagnostiky ložisek	37
2.6.1	Vibrodiagnostika	38
2.6.2	Hluková diagnostika	38
2.6.3	Termodiagnostika	39
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	40
3.1	Analýza problému	40
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	40
3.3	Cíl diplomové práce	41
4	MATERIÁL A METODY	42
4.1	Zkoušky kontaktní únavy ložiskového materiálu	43
4.1.1	Zkušební zařízení AXMAT	43
4.1.2	Software	45
4.1.3	Zkušební uzel	46

4.2	Experimentální materiál	46
4.3	Akustická emise	49
4.3.1	Systém Dakel XEDO (hardware)	49
4.3.2	Software Deamon a Daeshow	50
4.3.3	Snímače AE	51
4.4	Standardní metodika měření	53
4.4.1	Experimentální podmínky	54
4.4.2	Podmínky zkušebního uzlu	54
4.5	Vyhodnocení získaných dat	56
4.5.1	Akustická emise	56
4.5.2	Určení trvanlivosti materiálu	57
5	VÝSLEDKY	58
5.1	Predikce trvanlivosti	58
5.2	Návrh metodiky experimentů s dynamickou změnou	58
5.3	Zkoušky trvanlivosti ložiskového materiálu při statickém (konstantním) zatížení	60
5.3.1	Určení základní trvanlivosti	62
5.4	Trvanlivost ložiskového materiálu při dynamickém zatížení – jedna skoková změna	63
5.4.1	Určení základní trvanlivosti	65
5.5	Trvanlivost ložiskového materiálu při dynamickém zatížení – opakovaná skoková změna	66
5.5.1	Určení základní trvanlivosti	69
5.5.2	Zprovoznění hydraulické varianty zařízení AXMAT	70
6	DISKUZE	73
7	ZÁVĚR	76
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	77
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	80
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	82
11	SEZNAM TABULEK	85
12	SEZNAM PŘÍLOH	86

1 ÚVOD

Valivá ložiska jsou strojní součásti, které jsou hojně využívány v průmyslových strojích, ale i v běžně užívaných zařízeních. Důvodem užití těchto součástí je především vyvození tiššího a plynulejšího chodu příslušného zařízení, čímž dosáhneme jeho vyšší životnosti [1]. Jednotlivé typy strojů ovšem pracují za odlišných podmínek, z čehož vyplývají rozdílné požadavky na funkci daného ložiska. Mezi hlavní parametry ovlivňující trvanlivost ložiska patří jak materiál ložiska, tak i jeho geometrie. V některých situacích může být trvanlivost ložiska zásadně ovlivněna také charakterem zatěžování. V takovém případě má změna zatížení negativní vliv nejen na ložisko, ale i na celé zařízení. Za daných podmínek je také možný analytický výpočet trvanlivosti, avšak tyto hodnoty jsou převážně jen orientačního charakteru. Z toho důvodu je třeba se na tuto problematiku podrobněji zaměřit.

Málokterá ložiska jsou při běžném provozu vystavována pouze statickému (konstantnímu) zatížení. Právě dynamické (proměnlivé) zatížení může vést k dřívějšímu ukončení trvanlivosti ložiska. Tento průběh zatížení ložiska je typický především pro dopravní techniku. Příkladem může být jízda autem přes povrchové nerovnosti, přejezd vlakové soupravy přes výhybku nebo také obráběcí stroje při záběru břitů nástroje, kde se zatížení ložiska ze statické či nulové hodnoty skokově navýší. Toto skokové zatížení je tedy třeba aplikovat na vybraný ložiskový materiál až do ukončení jeho trvanlivosti. V této oblasti je nezbytné se zaměřit především na změnu trvanlivosti daného materiálu, při odlišných zatíženích, což povede k lepší predikci trvanlivosti ložisek.

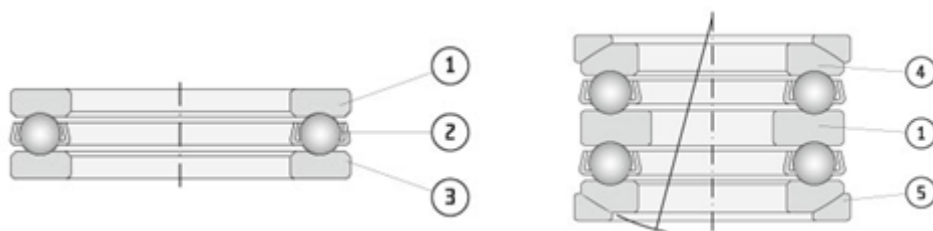
Na Ústavu konstruování v rámci Fakulty strojního inženýrství je v současné době řešen projekt Technologické agentury České republiky (TAČR), pod který spadá i tato diplomová práce. Náplní této práce je tedy především experimentální studium skokově zatěžovaného ložiskového materiálu (ocel 100Cr6), přičemž dochází k cyklickému namáhání materiálu pomocí skokové změny. Průběh samotných experimentů je pozorován pomocí metody akustické emise a také je zkoumáno, jaký vliv má skoková změna zatížení na signál akustické emise.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část se zabývá problematikou ložisek a experimentálními zkouškami ložiskových materiálů. Dále se zabývá popisem současných experimentálních zařízení pro zatěžování axiálních ložisek nebo jejich částí. V závěru se tato kapitola zaměřuje na metodu akustické emise, která zde slouží jako doplněk při vzniku kontaktní únavy ve zkoumané oceli.

2.1 Terminologie ložisek

Pro přesné vyjadřování v ložiskové problematice, je třeba respektovat výrazy, které jsou pro tuto problematiku užívané (pouze pro axiální ložisko) [2] – obr. 2.1:



obr. 2-1 Znáznornění axiálního ložiska [2]

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. Hřídelový kroužek | 4. Tělesový kroužek s kulovou |
| 2. Klec s valivými tělesy | dosedací plochou |
| 3. Tělesový kroužek | 5. Opěrný kroužek |

2.2 Základní ložiskové parametry

Na základě vnějších sil (velikost, směr a charakter zatížení) a požadavků na životnost, či spolehlivost ložiska, je možné určit jeho potřebnou velikost a druh, přičemž je třeba také přihlížet na následující podmínky: provozní teplota, požadavky na mazání, těsnění atd. [2]. Pro lepší orientaci v této problematice, jsou zde vypsány některé základní parametry, potřebné při určování správného ložiska.

2.2.1 Základní dynamická únosnost

Podle normy ISO 281:2007 je základní dynamická únosnost definována jako neproměnné zatížení, které může ložisko teoreticky přenášet při základní trvanlivosti jednoho milionu otáček [2]. Jedná se o hodnotu, jejíž velikost závisí na počtu valivých elementů, materiálu, velikosti a konstrukci ložiska a udává 90% spolehlivost ložiska při 10^6 otáček.

Základní dynamická únosnost se udává v kilonewtonech [kN] a značí se C_r pro radiální směr a C_a pro axiální směr.

2.2.2 Základní statická únosnost

Základní statickou únosnost stanovuje norma ISO 76. Jedná se o hodnotu, která závisí na geometrii ložiska, materiálu a počtu valivých elementů, přičemž je ložisko provozováno ve stavu, kdy se kroužky ložiska vůči sobě nepohybují nebo se pohybují velmi pomalými rychlostmi (např.: kývavý pohyb) [2].

Základní statická únosnost se udává v kilonewtonech [kN] a značí se C_{or} pro radiální směr a C_{oa} pro axiální směr.

2.2.3 Životnost ložisek

Životností ložiska je rozuměna schopnost ložiska plnit požadovanou funkci, pro kterou bylo navrženo do té doby, než nastane některý z mezních stavů, kromě vzniku kontaktní únavy. Při ukončení životnosti může dojít například k prasknutí klece či valivého elementu, zadření ložiska atd. [3]

2.2.4 Trvanlivost ložisek

Je-li ložisko správně namontováno, dobře mazáno, utěsněno vůči vnějším vlivům, jako je např.: vnikání prachu či jiných nečistot a není přetíženo, či přehřáto, pak může být jedinou příčinou jeho poruchy vznik kontaktní únavy [2]. Trvanlivost ložisek je dána počtem otáček (někdy se uvádí délka provozních hodin nebo délka ujeté dráhy), které vykoná jeden kroužek ložiska vzhledem k druhému, dokud se neobjeví první příznaky únavy materiálu na jednom z kroužků nebo na valivém elementu [3].

Jelikož žádný materiál, ani ložisková ocel, není zcela homogenní materiál, proto se každé ložisko stejného druhu a za stejných podmínek vykazuje různou trvanlivostí. Kvalita materiálu má tedy podstatný vliv na rozptyl trvanlivosti [2]. Trvanlivost ložisek, lze rozdělit do dvou kategorií, a to na skutečnou a vypočtenou.

Trvanlivost skutečná

Skutečná trvanlivost ložiska je doba chodu ložiska až do vzniku kontaktní únavy (pittingu) na některé z oběžných drah či valivém elementu. Vzhledem k velkému rozptylu skutečné trvanlivosti ložisek je pro lepší orientaci používána trvanlivost vypočtená [3].

Trvanlivost vypočtená

Trvanlivost vypočtená je používána z důvodu rozdílné trvanlivosti u stejného druhu ložisek. Výrobci většinou udávají základní trvanlivost, což je trvanlivost, kterou dosáhne nebo překročí daná skupina ložisek (20 až 30), při splnění spolehlivosti na 90 %. To lze matematicky vyjádřit rovnicemi ve tvaru:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2-1)$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (2-2)$$

kde:

L_{10}	– základní trvanlivost, při spolehlivosti 90 %	[10^6 ot.]
L_{10h}	– základní trvanlivost, při spolehlivosti 90 %	[h]
C	– základní dynamická únosnost	[kN]
P	– ekvivalentní dynamické zatížení ložiska	[kN]
n	– rychlost otáček	[min^{-1}]
p	– mocnitel (pro ložiska s bodovým kontaktem $p = 3$; pro ložiska s čárovým kontaktem $p = 10/3$)	[-]

V praxi se můžeme setkat s trvanlivostí pro různou spolehlivost. Pro tento případ existuje korigovaná základní trvanlivost, přičemž se při výpočtu nezohledňuje jen vliv zatížení, ale i materiálových vlastností, mechanických a fyzikálních vlastností maziva a teploty vnějšího okolí [4]:

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10} \quad (2-3)$$

kde je:

L_{na}	– upravená trvanlivost pro spolehlivost (100-n) %	[10^6 ot.]
a_1	– koeficient spolehlivosti pro jinou než 90 % spolehlivost	[-]
a_{23}	– koeficient materiálu, maziva technologie výroby a provozních podmínek	[-]
L_{10}	– základní trvanlivost	[10^6 ot.]

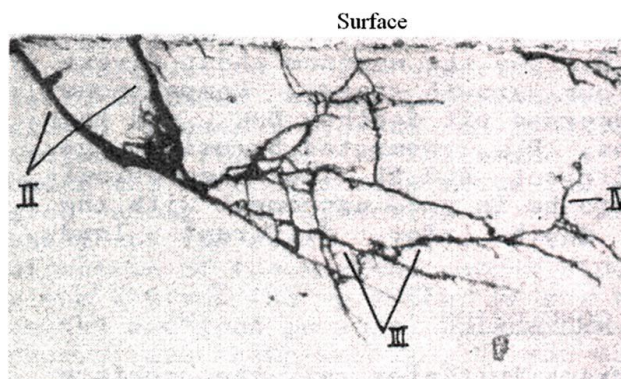
Existují i jiné přístupy pro určení trvanlivosti ložisek, ty jsou však vlastněny soukromými firmami, tudíž není možné zjistit další informace, týkající se této problematiky.

2.3 Únava materiálu

2.3.1 Kontaktní únava

Únavové opotřebení, týkající se ložisek, se nazývá kontaktní únava. Kontaktní únava (*anglicky: rolling contact fatigue - RCF*) je mezní stav, který se projevuje odlupováním materiálu v místě styku valivého elementu a kroužku ložiska [5]. Kontaktní únava může tedy nastat buď na valivém prvku, nebo na kroužku ložiska, konkrétně na dráze valivých elementů.

V současné době rozlišujeme dva mechanismy, které zapříčiňují vznik kontaktní únavy. V prvním případě se únava iniciuje pod povrchem oběžné dráhy, a to v místě největšího smykového napětí [6]. Právě v tomto místě se začínají vytvářet mikrotrhliny v té oblasti, kde není materiál homogenního charakteru a trhlina se šíří směrem k povrchu. Ve druhém případě dochází k iniciaci trhliny na povrchu styčných ploch, a to vlivem plastických deformací [7]. Trhlina se dále šíří směrem od povrchu dovnitř materiálu, a to do té doby, než nedosáhne kritické hodnoty a dojde k odloupení materiálu. Samotné odloupení materiálu a následný vznik důlku se nazývá v ložiskové terminologii jako tzv. makropitting nebo jen pitting. Tento proces vede k poruše ložiska, čímž dojde k ukončení jeho trvanlivosti a vyřazení ložiska.



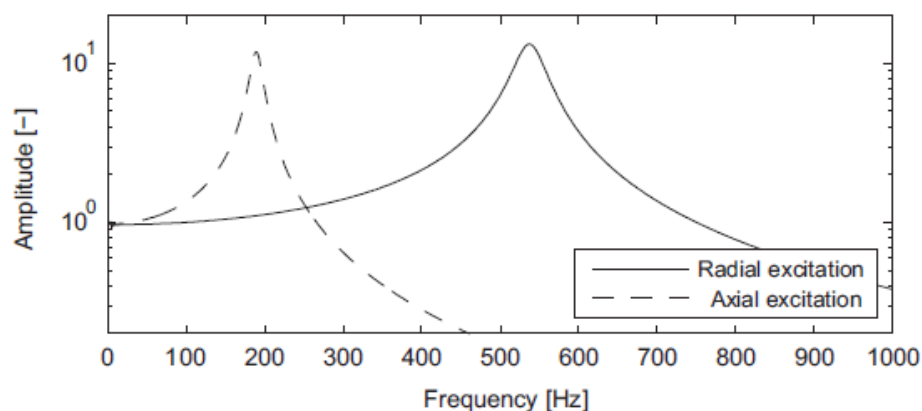
obr. 2-2 Šíření trhliny materiálem [8]

Degradace materiálu díky kontaktní únavě, je možné rozdělit do čtyř částí – viz obr. 2-2. I – vydrolení, II – ustálený proces elastické deformace, III – nestabilní šíření trhliny a IV – iniciace trhliny.

2.3.2 Dynamicky zatěžovaná ložiska

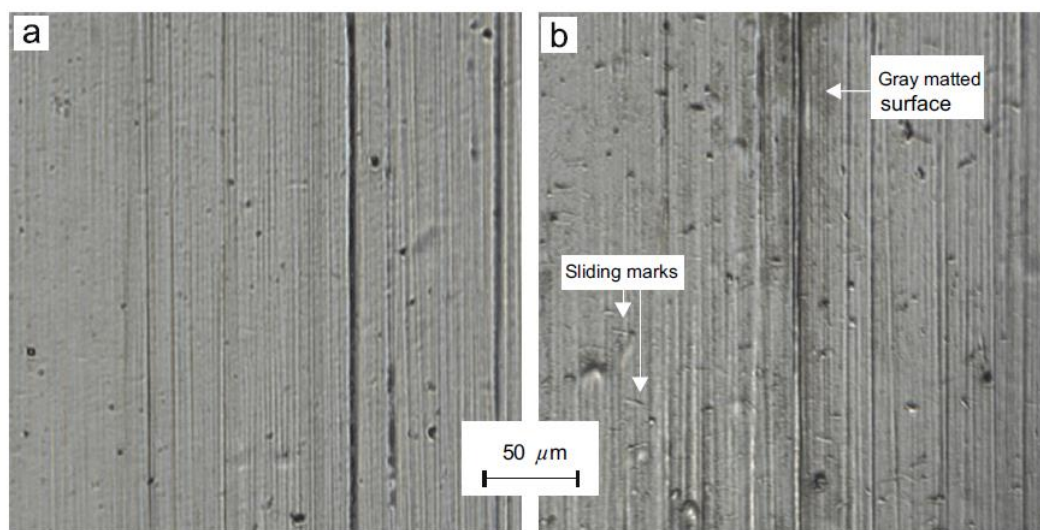
Vnější dynamické zatěžování může zásadně ovlivnit trvanlivost ložiska. Studie popisující chování radiálního ložiska pod dynamickým zatěžováním je tedy shrnuta v této kapitole.

Zatěžování probíhalo následujícím způsobem. Radiální ložisko bylo zatíženo statickým zatížením 950 N a otáčkami 900 ot/min, přičemž bylo vyvozeno frekvenční buzení v axiálním a radiálním směru [9]. Dynamické zatížení se kontinuálně zvyšovalo až do dosažení rezonanční frekvence.



obr. 2-3 Průběh dynamického zatížení ložiska v radiálním a axiálním směru [9]

Na základě výpočtu byla stanovena trvanlivost ložiska (L_{10}), která činila 1516 dní. Test byl zkrácen na 7 dní vzhledem k časové náročnosti experimentu (0,5 % původní trvanlivosti). I přes to, bylo porušení znatelné. Vyhodnocení proběhlo pomocí světelného optického mikroskopu, přičemž byla porovnána výsledná kvalita povrchu (viz obr. 2-4).

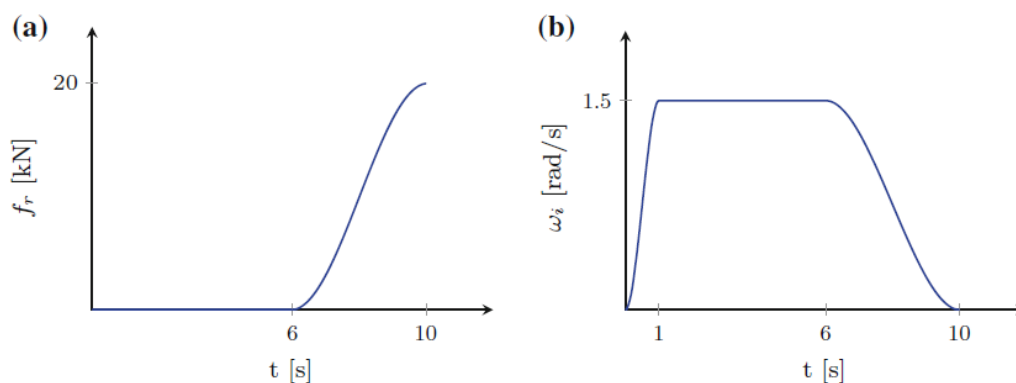


obr. 2-4 Výsledný povrch drážky (a – statické zatížení, b – dynamické zatížení)

2.3.3 Proměnlivě zatěžovaná ložiska

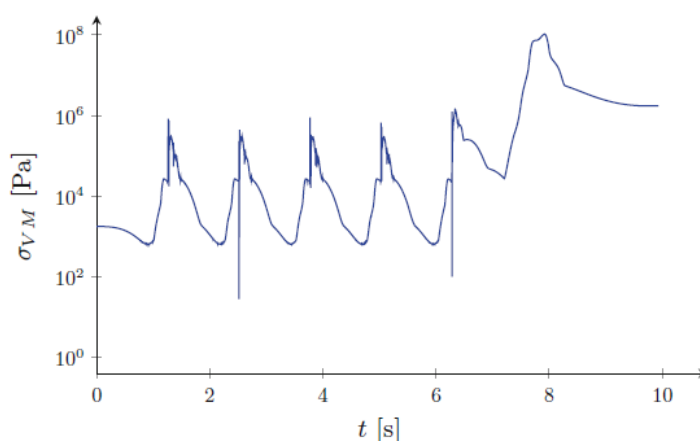
V této kapitole jsou shrnuty publikace, které se zmiňují o proměnlivých provozních podmínkách ložisek. Publikace spadající do této problematiky se zabývají především možnostmi, jak vypočítat vliv proměnného zatěžování ložisek.

První publikace se zabývá metodikou odhadu kontaktní únavy valivých ložisek při nestacionárních podmínkách [10]. Pro výpočet je zde použito ložisko o vnějším průměru 147,26 mm s osmi kuličkami. Výpočet je proveden pomocí vytvořeného výpočtového modelu, na kterém je zkoumán průběh napětí při zatěžování ložiska. V průběhu simulace je vnější kroužek ložiska vetknut a vnitřní rotuje, přičemž velikost radiálního zatížení se postupně zvyšuje od 0 kN do 20 kN a mění se i rychlost otáčení. Podrobnější pohled na průběh zatížení je možné vidět na obr. 2-5.



obr. 2-5 Nestacionární podmínky při simulaci: (a) Radiální síla, (b) Rychlost otáčení hřídele [10]

Pro získání průběhu napětí v čase, jsou provedeny dva výpočty. Nejprve je spočítán průběh napětí v kontaktu mezi všemi valivými elementy a kroužkem, a to s využitím dynamického modelu. Dále je pomocí metody konečných prvků odhadnuta oblast největšího zatížení (oblast největšího redukovaného napětí dle podmínky HMM), přičemž je aplikováno jednotné zatížení v různých úhlových pozicích kroužku ložiska.



obr. 2-6 Časový průběh redukovaného napětí [10]

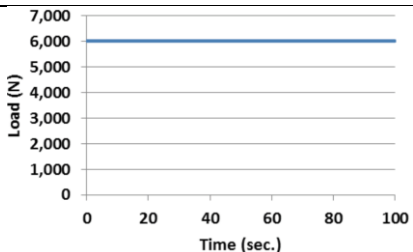
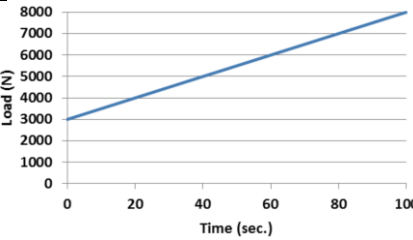
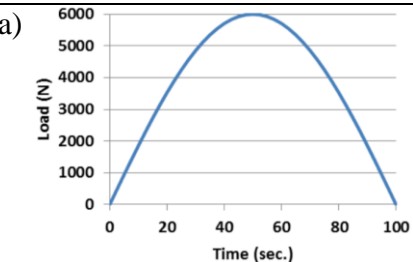
Následuje určení únavové životnosti dle Goodmanova kritéria a dále je dle Palmgren-Minerova pravidla určen počet cyklů do dosažení mezního stavu únavy, jehož hodnota činí $7,576 \cdot 10^5$ cyklů.

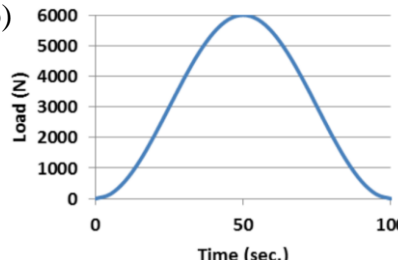
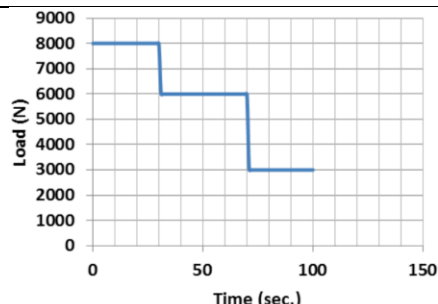
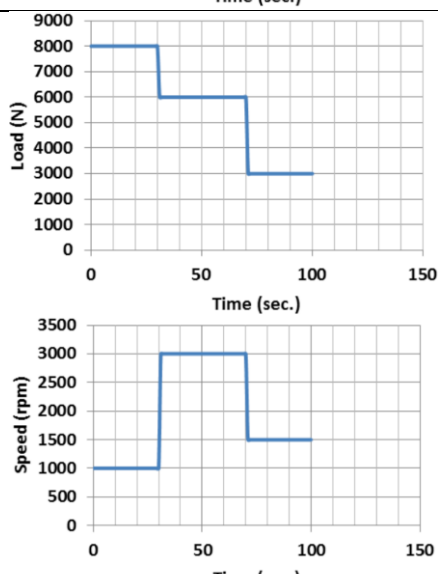
Dále se tato studie také zabývá vlivem poškození ložiska na trvanlivost ložiska. Pokud v ložisku nastane odlupování materiálu z povrchu kontaktních ploch, tak tento druh poškození zvýší kontaktní napětí na opačné straně ložiska, jelikož poškozený element ztratí kontakt s kroužkem. Právě to způsobí přetížení ostatních valivých elementů, což výrazně zkrátí trvanlivost ložiska. Tento vadný stav vede ke vzniku kontaktní únavy při dosažení $9,69 \cdot 10^3$ cyklů, což znamená, že ztráta kontaktu mezi kroužkem a valivým elementem ložiska vede k dřívější poruše ložiska. V tomto případě to znamená, že když nastane přetížení ložiska díky vzniku této vady, tak se trvanlivost ložiska sníží přibližně 78krát.

Další publikace se opět zabývá metodikou pro odhad trvanlivosti valivých ložisek při nepravidelném vnějším zatížení [11]. Ovšem na rozdíl od předchozí studie jsou zde provedeny analytické výpočty proměnlivého zatěžování ložisek. Je zde použita metoda, která rozděluje zatížení do několika malých sloupců, kterým je přiřazena průměrná hodnota zatížení a vypočítána trvanlivost ložiska při tomto zatížení. Celý výpočet, ale především výpočet průměrné hodnoty sloupce je proveden pomocí programu MATLAB. Na druhou stranu je zde také použit výpočet, který určí střední hodnotu zatížení ložiska a následně je také určena trvanlivost ložiska. Výpočty jsou provedeny pro válečkové ložisko, jehož základní dynamická únosnost činí 67 kN.

V následující tab. 2-1 jsou uvedeny průběhy zatěžování, podle nichž byl výpočet proveden.

tab. 2-1 Vzorce pro výpočet střední velikosti zatížení a trvanlivosti proměnlivého zatížení [11]

Pořadí	Popis	Profil zatížení	Uzavřená forma vzorce ložiskové trvanlivosti
1	Konstantní zatížení a otáčky ($N = 1500 \text{ min}^{-1}$)		$F_{eq} = F_{max}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$
2	Lineárně rostoucí zatížení při konstantních otáčkách ($N = 1500 \text{ min}^{-1}$)		$F_{eq} = \frac{F_{min} + 2F_{max}}{3}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$
3	Sinusový tvar zatížení při konstantních otáčkách ($N = 1500 \text{ min}^{-1}$)	a) 	a) $F_{eq} = 0,75 \cdot F_{max}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$

		b) 	b) $F_{eq} = 0,65 \cdot F_{max}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$
4	Skokově rostoucí zatížení při konstantních otáčkách ($N = 1500 \text{ min}^{-1}$)		$F_{eq} = \left(\frac{\sum (F_i^p \cdot t_i)}{\sum t_i} \right)^{1/p}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$
5	Skokově rostoucí zatížení při proměnlivých otáčkách		$F_{eq} = \left(\frac{\sum (F_i^p N_i t_i)}{\sum N_i t_i} \right)^{1/p}$ $L_{10} = \left(\frac{C}{F_{eq}} \right)^p$

Na závěr jsou výpočtové metody trvanlivostí ložiska porovnány a je určena jejich odchylka. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tab. 2-2.

tab. 2-2 Shrnutí výsledků [11]

Pořadí	Popis	Uzavřená forma ložiskové trvanlivosti (10^6 ot.)	Technika rozdělení zatížení ložiskové trvanlivosti (10^6 ot.)	Odchylka (%)
1	Konstantní zatížení a otáčky	3112,28	3112,28	0,00

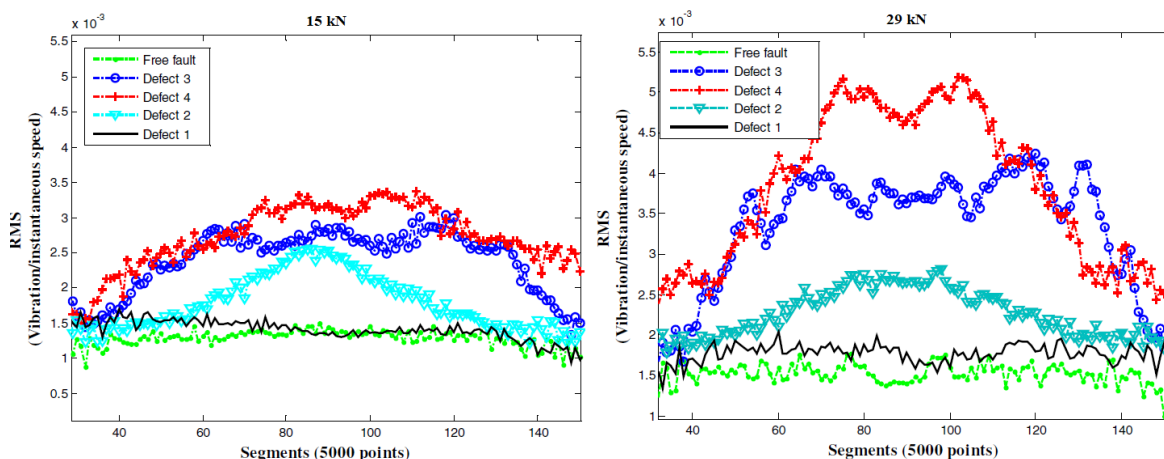
2	Lineárně rostoucí zatížení při konstantních otáčkách	2599,01	3208,10	23,44
3	Sinusový tvar zatížení při konstantních otáčkách	a) 8119,72 b) 1308,80	a) 7432,16 b) 10045,06	a) -8,47 b) -23,22
4	Skokově rostoucí zatížení při konstantních otáčkách	2566,58	2537,70	-1,14
5	Skokově rostoucí zatížení při proměnlivých otáčkách	2993,58	2960,81	-1,09

Výsledky ukazují dobrou shodu pro většinu případu zatížení, s výjimkou výpočtů v případech 2 a 3b (tab. 2-2). Tyto velké odchylky jsou důsledkem chyb při zaokrouhlování, které vznikly při určování průměrné hodnoty sloupce. Tato práce ukazuje, že metodika rozdělení zatížení na několik menších sloupců, kterým je přiřazena průměrná hodnota zatížení z tohoto rozmezí sloupce je obecný přístup pro odhad únavové trvanlivosti valivých ložisek při jakémkoliv zatížení.

Další publikace se zabývá sledováním poškozených ložisek spallingem při proměnných rychlostech otáčení [12]. Hlavní problém, který se snaží řešit tato publikace je v tom, že pokud se zvýší rychlost otáčení ložiska, zvýší se také vibrační odezva získaná akcelerometry, což vede k maskování veškerých vad, které mohou být detekovány. Pro překonání tohoto problému je zde navržen nový ukazatel, který využívá signálu z akcelerometru a signál z optického snímače (enkodéru). Každý vzorek signálu z akcelerometru je dělen jeho odpovídajícím vzorkem okamžité rychlosti. Na výsledný signál je poté použita metoda RMS (*Root Mean Square*) – efektivní hodnota signálu. Experimenty jsou provedeny na axiálních ložiscích, přičemž jsou v každém ložisku použity různé velikosti defektů (tab. 2-3). Toto poškození je vždy jen na jednom kroužku ložiska. Při experimentu se rychlost otáčení nejdříve zvyšovala z 50 min^{-1} na 1000 min^{-1} (15 s), následně byla udržena konstantní rychlost otáčení (2 s), a na konec se rychlost otáčení snížila na počátečních 50 min^{-1} . Celý experiment trval 35 s.

tab. 2-3 Velikost poškození povrchu spallingem [12]

Číslo defektu	Defekt 1	Defekt 2	Defekt 3	Defekt 4
Velikost poškozeného povrchu (mm^2)	0,8	3,6	9,2	13,3



obr. 2-7 Průběh experimentů při zatížení externí silou 15 kN a 29 kN [12]

Výsledky experimentu ukazují, že nově navržený indikátor dokáže diagnostikovat stav ložiska bez ohledu na změnu rychlosti a může také klasifikovat závažné vady valivých ložisek, což není dosažitelné klasikou efektivní hodnotou.

Všechny tyto vzorce a výpočty základní trvanlivosti ložisek zachycuje norma ISO 281:2007, která se zabývá právě touto problematikou.

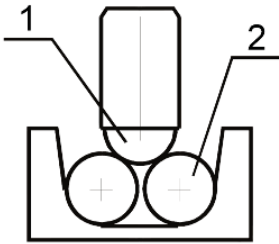
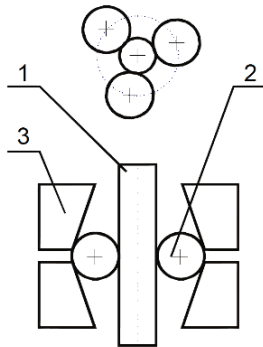
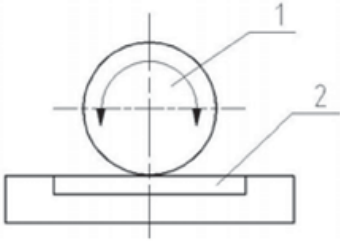
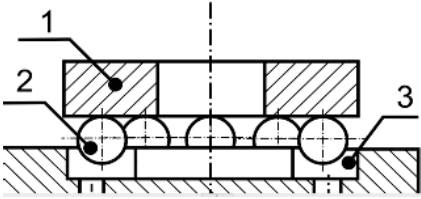
2.4 Experimentální zařízení pro zkoušky trvanlivosti ložiskových materiálů

Experimentální měření trvanlivosti valivých ložisek slouží především ke stanovení jejich základní dynamické únosnosti [13]. Ta je ovšem také omezena vznikem kontaktní únavy, a to v místech oběžných drah na kroužku nebo ve valivých elementech.

V dnešní době existuje velké množství různých metod pro testování kontaktní únavy ve valivých ložiscích. Problém je však v tom, že testování ložisek je velice časově náročné a také z finančního hlediska poměrně nevýhodné. V současnosti jsou tedy používána, a také vyvíjena zařízení, kterými je možné provádět zkoušky na geometricky zjednodušených částech ložisek, které mohou být testovány v různých konfiguracích (disk – kulička, váleček – kulička atd.). Podle uspořádání jednotlivých geometrických prvků je tedy možné simulovat, jak bodový, tak čárový kontakt, přičemž lze v tomto místě studovat vliv různých vlastností jako je např. vliv mazání nebo tření na trvanlivost ložiska.

Existuje několik základních experimentálních zařízení, které můžeme použít pro měření kontaktní únavy. Jedním nejspíše z nejstarších zařízení je čtyř-kuličkový zkušební stroj. Toto zařízení při dané konfiguraci simuluje kontakt v kuličkovém ložisku s kosoúhlým stykem. Mezi další zkušební stroje s bodovým kontaktem patří např. model s uspořádáním kulička-tyč-kuželové valivé dráhy, kulička na testovacím vzorku nebo zařízení AXMAT.

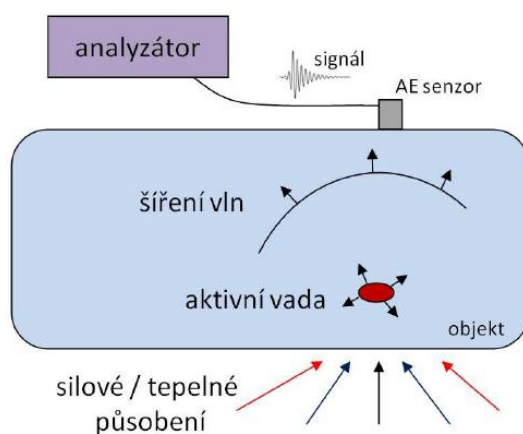
tab. 2-4 Testovací zařízení bodového kontaktu [12], [14]

Typ zkušebního stroje	Schéma	Pracovní podmínky
Čtyř-kuličkový stroj		Druh vzorku: Kulička 1/2" Max. Hertzův tlak: 8,7 GPa 1 – horní kulička 2 – dolní kuličky
Kulička – tyč (Ball on rod)		Druh vzorku: Tyč Max. Hertzův tlak: 5,5 GPa 1 – tyč 2 – kuličky 3 – kuželové valivé dráhy
CTD-ROLL		Druh vzorku: Kulička Max. Hertzův tlak: 8,7 GPa 1 – horní kulička 2 – dolní kuličky
Unisteel plochý vzorek (AXMAT)		Druh vzorku: Disk Max. Hertzův tlak: 6 GPa 1 – disk 2 – kuličky 3 – opěrný kroužek

Dále také existují zkušební stroje, které simulují čarový kontakt. Jedná se o stroje v konfiguraci např.: disk – disk, disk – válec – disk nebo tyč – tři disky. Vzhledem k tomu, že se tato diplomová práce týká zatěžování plochého vzorku, kde dochází k bodovému kontaktu, bude pro testování kontaktní únavy použito zařízení AXMAT, a to i především z důvodu dostupnosti zařízení na Ústavu konstruování. U tohoto zařízení je hřídelový kroužek ložiska nahrazen plochým vzorkem, který je zatěžován axiálně přes libovolný počet kuliček.

2.5 Metoda akustické emise

Akustická emise je nedestruktivní metoda, kterou lze popsat jako fyzikální jev, při kterém se vlivem generovaných dynamických napětových vln emitovaných uvnitř materiálu uvolňuje elastická energie (také v podobě vln) [15]. Jedná se o velice účinnou a efektivní technologii používanou pro určení lomu či detekci únavy u kovů, skelných vláken, dřeva, kompozitů atd. Tuto metodu je také možné použít pro detekci úniku v tlakových nádobách apod. Velkou výhodou této metody je, že je schopna detekovat změnu struktury materiálu, již při její iniciaci, čímž je možné zabránit případné havárii. V této diplomové práci je tato metoda využita ke zkoumání vzniku kontaktní únavy při experimentech na vzorku ložiskového materiálu.



obr. 2-8 Zjednodušené schéma principu akustické emise [16]

Metodou akustické emise se rozumí detekce signálu vzniklého aktivní vadou, následné zpracování elektronického signálu, a nakonec jeho vyhodnocení [16]. Celý proces vzniku, detekce a vyhodnocení signálu akustické emise je možné rozdělit do několika základních fází (obr. 2-8):

1. Zdroj akustické emise (posun, dislokace, prasknutí, utrnutí materiálu)
2. Šíření napětových vln – od vady k detekovanému místu snímačem
3. Detekce napětových vln pomocí snímače akustické emise (transformace akustické emise ze snímače na elektrický signál)
4. Analogové zpracování a vedení signálu na vstup vyhodnocení signálu
5. Vyhodnocení výsledného elektrického signálu měřícím systémem akustické emise

2.5.1 Prvky aparatury akustické emise

Každá sestava pro měření akustické emise se skládá z několika základních prvků, které jsou zobrazeny na obrázku 2-9 a popsány níže.

Snímače akustické emise

Nejčastějšími zařízeními pro snímání akustické emise k detekci vln jsou snímače s piezoelementy [17]. Díky jejich deformaci, která je způsobena šířícími se vlnami, vzniká v elektrodách napětí, které je přeneseno do předzesilovače. Snímače akustické emise se připevňují na přímo nebo přes vlnovod. Přímá instalace spočívá v přitlačení čela akustického snímače na měřenou součást. Při instalaci snímače přes vlnovod se na povrch měřené součásti přitlačí nebo přivaří vlnovod, což je tenká tyč, která prodlužuje snímače akustické emise. Toho se využívá především tehdy, pokud je povrch měřené součásti velice horký a neumožňuje přímé přichycení snímače na součást. Před každým měřením se nesmí zapomenout na kalibraci snímačů, jinak může být měření nepřesné.

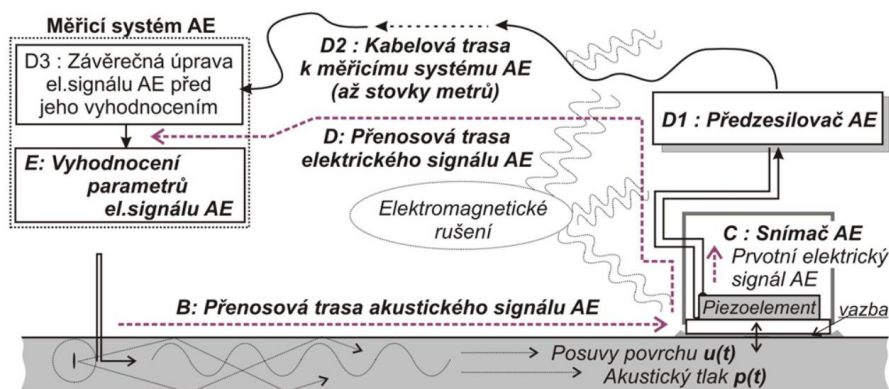
Předzesilovače akustické emise

Elektrický signál vyslaný z elektrod piezoelementu snímače je poněkud slabý, a proto je třeba ho zesílit, aby mohl být veden i stovky metrů daleko [17]. Předzesilovač má tedy hlavní funkci zesílit signál, provést základní frekvenční filtraci a přizpůsobit signál impedančně kabelu. Z pravidla bývá zapojen za snímačem (do tří metrů) nebo může být integrován přímo ve snímači.

Kabelové trasy

Po průchodu signálu přes předzesilovač je signál veden kabelovou trasou k měřicímu systému [17]. Signál by měl být veden kabelem, pokud možno, beze ztrát, bez deformací časového a frekvenčního tvaru a bez indukovaného elektromagnetického rušení na kabelové trase. Při vedení signálu kabelem řádově ve stovkách metrů dochází k útlumu signálu, a to především ve vyšších frekvencích (300 kHz a výše). Pro vedení signálu akustické emise se používají koaxiální kabely, ale je možné se setkat i s kroucenými stíněnými páry nebo trixiálními kabely.

Na závěr je signál přiveden z kabelové trasy na konektor, který vstupuje do kanálu měřicího zařízení. Měřicí kanál je jednotka měřicího systému, která provádí závěrečnou analogovou úpravu signálu akustické emise před jeho vyhodnocením a také samotné vyhodnocení výsledného signálu akustické emise, čímž je myšleno získání číselných hodnot signálu. Závěrem je možné signál přivedený na vstup systému ještě přizpůsobit frekvenční filtrací signálu nebo signál zesílit či utlumit.



obr. 2-9 Schéma přenosové trasy akustické emise [17]

2.5.2 Signál akustické emise

Pro signál akustické emise je typické frekvenční pásmo, které leží v rozmezí 20 kHz a 1 MHz [17]. Při detekci rázové vlny, vzniká tzv. hit. Pokud jsou hity v časové posloupnosti, tvoří signál, který je nazýván praskavý. Pokud se hity hustě překrývají, jedná se o signál, který je nazýván spojitý.

Praskavý signál

Signál tvoří jednotlivé časové posloupnosti, které se po určitých časových intervalech opakují [17].



obr. 2-10 Praskavý signál [14]

Spojitý signál

U spojitého signálu nastává mnoho událostí současně. Vlny akustické emise se navzájem překrývají, sčítají, odčítají, čímž vzniká tzv. akustický šum [17].



obr. 2-11 Spojitý signál [14]

2.5.3 Měření akustickou emisí

Při měření metodou akustické emise je nutné dodržet dohodnutý postup, který je stanoven normou ČSN EN 13 554 [18]. Tato norma také uvádí požadavky na písemné dokumenty, které musí být součástí každé zkoušky akustické emise – zkušební protokol (protokol týkající se zkušebního postupu) a protokol o zkoušce (protokol týkající se dosažených výsledků). Dále tato norma uvádí, že zkouška akustické emise se skládá z následujících částí¹:

1. Předběžné informace – cílem je shromáždění dat o zkoušeném objektu, ujasnění cílů a účelu zkoušky a dohoda o výstupech zkoušky.
2. Předběžná příprava (vypracování zkušebního postupu) – volba systému a měřicí techniky, určení rozmístění snímačů a jejich kalibrace a kalibrace měřicího systému.
3. Příprava na místě zkoušky – příprava povrchu pro upevnění snímačů, instalace měřicího zařízení, ověření šumu kanálů, zajištění spojení mezi operátorem a řídicím stanovištěm.
4. Sběr dat a On-Line analýza – sledování a záznam průběhu zkoušky, analýza dat, lokalizace aktivních zdrojů.
5. Následné činnosti – jedná se o vyhodnocení zkoušky, klasifikaci a interpretaci zdrojů a sepsání závěrečného protokolu.

2.5.4 Monitorování ložisek pomocí metody akustické emise

V současné době, jsou kladeny čím dál větší požadavky na spolehlivost a kvalitu rotačních uzlů strojních součástí. Velice podstatnou záležitostí je také určení předběžné životnosti strojů a klíčových uzlů, které by mohly ohrozit výrobu, což by mohlo způsobit finanční komplikace [19]. Z důvodu zabránění neočekávaným jevům se používají především nedestruktivní metody. Tyto metody se využívají k zjištění aktuálního stavu součásti, díky čemuž je možné včas odstavit zařízení nebo dopředu naplánovat případnou odstávku na opravu.

Monitorování ložisek se využívá především u velkých zařízení, jako jsou např.: ložiska turbín nebo ložiska větrných elektráren atd. [19]. Právě u větrných elektráren může nastat neočekávané zatížení (může se zvýšit rychlost otáček nebo může narůst teplota vlivem změny počasí – vítr, slunce, déšť), což může vyvolat havárii. Hlavním cílem monitorování ložisek je tedy předejít haváriím, které by mohly mít v tomto případě katastrofální následky.

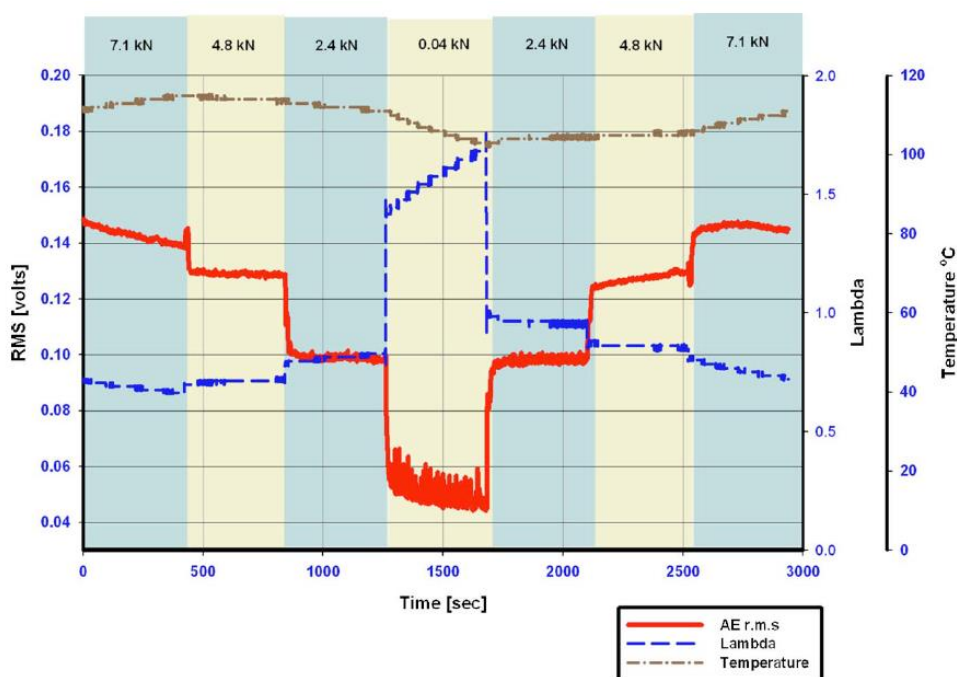
¹ U jednotlivých částí zkoušky jsou vypsány pouze ty nejdůležitější úkony. Více informací viz norma ČSN EN 13 554.

Proměnlivým zatěžováním ložisek se zabýval J.Couturier et al.[20]. Ve své studii popisuje vliv proměnlivého zatěžování na signál akustické emise, přičemž se mění rychlosti otáček, velikosti zatížení a vše probíhá za konstantní teploty.

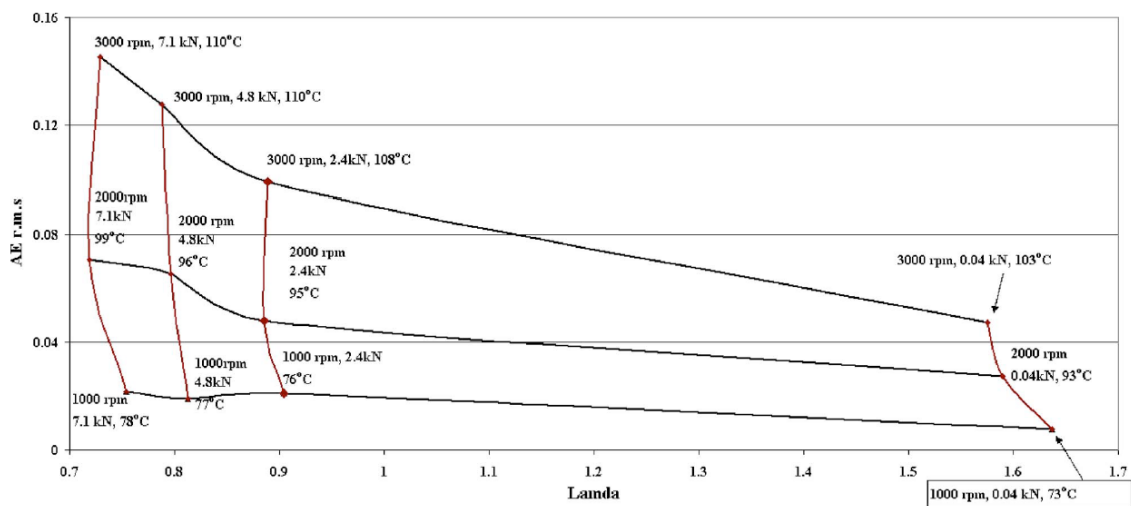
Samotný experiment proběhl na radiálním děleném ložisku s deseti válečkovými valivými elementy. Vnější průměr ložiska činil 84 mm, vnitřní 40 mm a průměr valivých elementů byl 12 mm. Ložisko bylo mazáno mazivem Castrol Moly. Dále byly použity 3 snímače akustické emise (PAC PICO) s frekvenčním rozsahem 300 kHz až 1 MHz, které byly umístěny na vnějším kroužku ložiska. Výstupní signál byl zesilován pomocí předzesilovače v rozmezí 20–40 dB. Celkem byly provedeny dva experimenty. Nejprve se měnili rychlosti otáčení (1000 min^{-1} , 2000 min^{-1} , 3000 min^{-1} , 4000 min^{-1}) od nejmenší po největší a zpět po nejmenší při konstantním zatížení 4,8 kN. Při druhém experimentu se měnila velikost zatížení (40 N – statická hmotnost ložiska; 2,4 kN; 4,8 kN a 7,1 kN) opět od nejmenšího po největší a zpět při konstantních otáčkách 3000 min^{-1} .

Výsledky jsou zobrazeny v grafech, přičemž je zde zachycen signál AE, teplota a parametr mazání λ , který je analyticky dopočítáván z minimální tloušťky mazacího filmu.

Na prvním z obrázků (2.12) je evidentní, že při snižování zatížení ložiska se také snižuje efektivní hodnota signálu AE (RMS). Snižování zatížení má naopak vliv na parametr mazání, který vzroste. Teplota se pohybovala v rozmezí $\pm 4^\circ\text{C}$, což způsobilo maximální relativní odchylku ve výpočtu parametru mazání o 10 %.

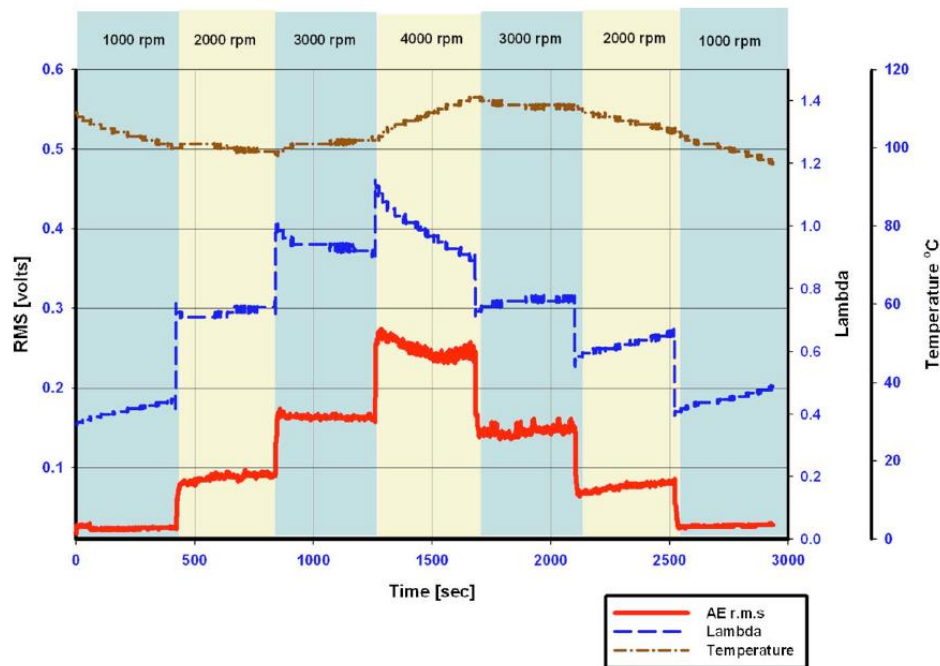


obr. 2-12 Signál akustické emise při proměnlivém zatížení (konstantní otáčky 3000 min^{-1}) [20]



obr. 2-13 Procesní mapa proměnlivého zatížení [20]

Na obrázku 2.14 je zachycen druhý experiment, který se zabývá změnou rychlosti otáček. Průběh signálu AE je obdobný jako při první experimentu, což znamená, že zvýšením otáček se zvýší hodnota signálu AE, ovšem co se týče parametru mazání, tak s rostoucími otáčkami se snižuje.



obr. 2-14 Signál akustické emise při proměnlivých otáčkách (zatížení 4,8 kN) [20]

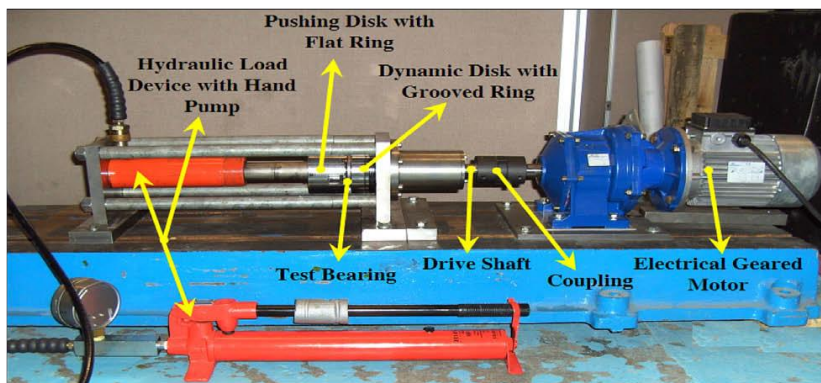
Závěrem je třeba zmínit, že změny parametrů zatížení ložiska mají zásadní vliv na signál AE, což bylo ukázáno dvěma experimenty. Díky užití provozních map (obr. 2-13) je možné například provozovatelům valivých ložisek s proměnným zatížením nebo se změnou rychlosti otáčení poskytnuto včasného varování před selháním ložiska.

2.5.5 Využití metody akustické emise k určení poškození axiálních ložisek nebo jejich částí

Experimenty při statickém zatížení

Mba se ve svých studiích zabývá především zatěžováním ložisek při pomalých rychlostech otáčení, a následnou detekcí a lokalizací poškození právě pomocí metody akustické emise [21].

Testovanou součástí je standardní axiální kuličkové ložisko, přičemž jeden kroužek ložiska je standardní a druhý je nahrazen rovným diskem, který je používán pro válečková ložiska. Díky tomuto uspořádání vznikl na rovném disku větší kontaktní tlak, než kdyby byl ponechán standardní kroužek ložiska. Tato studie se zabývá statickým zatěžováním ložisek, přičemž je test provozován způsobem „run-to-fail“. To znamená, že test běží od spuštění až po vznik kontaktní únavy, tedy ukončení trvanlivosti ložiska. Testovací zařízení, které je použito pro tento výzkum je podobné zařízení AXMAT, ovšem rozdíl je v tom, že je ložisko uloženo horizontálně a zatížení je vyvoláváno přes hydraulický píst, viz obrázek 2-15.



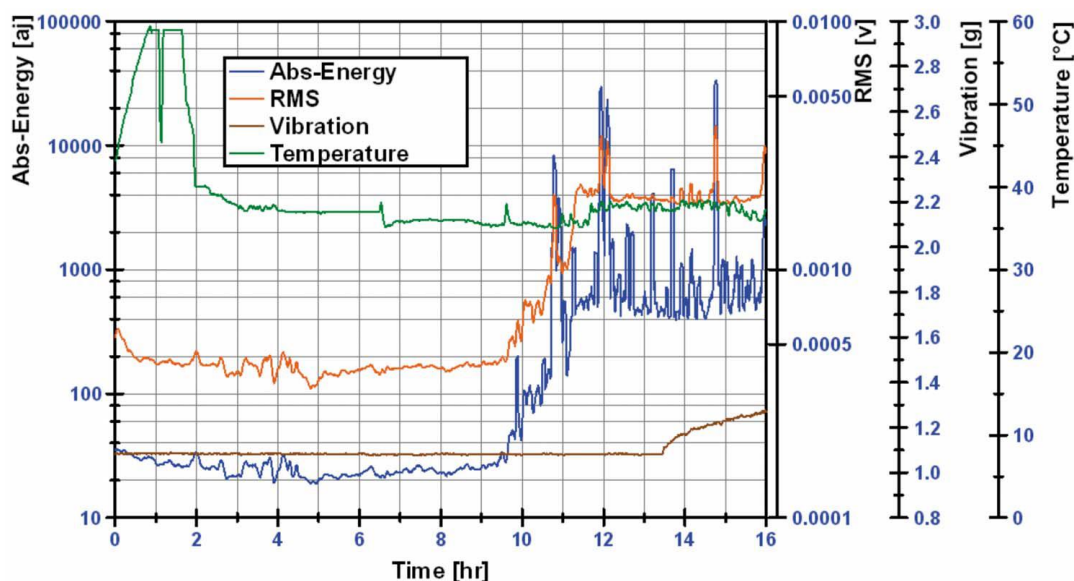
obr. 2-15 Použité testovací zařízení [21]

Pro snímání byly použity čtyři snímače akustické emise s rozsahem 200-750 kHz a dva termočlánky, přičemž byly provedeny tři testy pro velikost zatížení 20, 35 a 50 kN .

V prvním případě bylo ložisko zatíženo silou o velikosti 50 kN a celý test trval 16 hodin. Během první hodiny testu došlo ke zvýšení hladiny akustické emise a teploty, což bylo způsobeno záběhem ložiska. Po dobu dalších 9 hodin byly provozní parametry konstantní. Od 10. hodiny testování se začaly zvyšovat hodnoty akustické emise, a to do doby ukončení trvanlivosti, což činilo 16 hodin od zahájení testu. Průběh zkoušky je znázorněn na obrázku 2-17.



obr. 2-16 Zkušební vzorek [21]

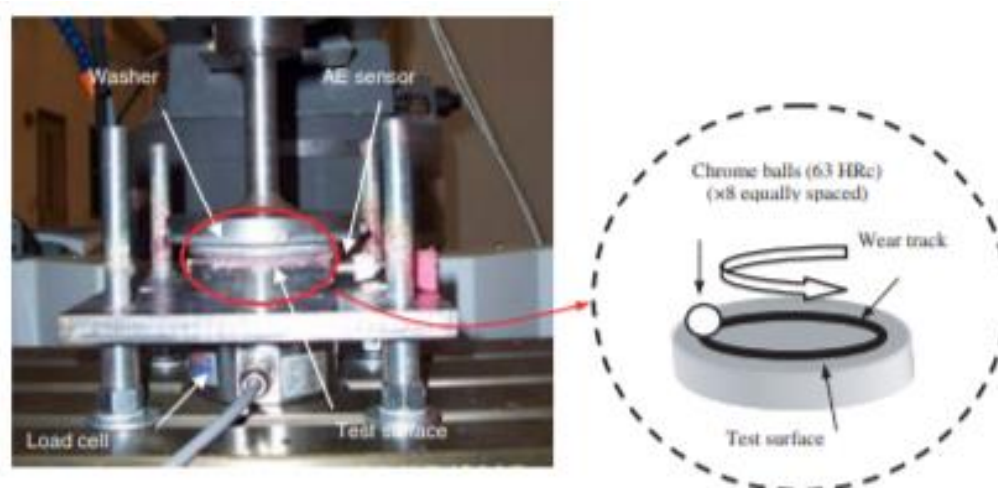


obr. 2-17 Průběh experimentálního ověření ložiskového kroužku při zatížení 50kN [21]

Další testování probíhalo stejným způsobem i pro ostatní ložiska, přičemž při zatížení ložiska 35 kN test trval 20 hodin a při zatížení ložiska 20 kN test trval 50 hodin.

Závěrem z tohoto pokusu tedy vyplývá, že akustická emise je spolehlivý, robustní a citlivý parametr pro detekci počátečních trhlin a povrchových spár během provozu ložiska. Rovněž se ukázalo, že akustická emise je schopna určit zdroj primárního porušení během provozu ložiska.

Podobnou problematikou se také zabývali A.W. Warren a Y.B. Guo [22]. Ve své studii popisují vliv kvality broušeného povrchu na vznik kontaktní únavy. Pro monitorování a vyhodnocení je použita metoda AE, jelikož je citlivá na únavové poškození tohoto typu. Pro experiment byla použita ocel ALSI 52100 (100Cr6). Zkušební vzorek byl upnut do obráběcího stroje Bridgeport, který je schopen vyvodit otáčky až 4000 min^{-1} . Zkušební uzel se dále skládal z osmi kuliček o průměru 5,56 mm, které jsou umístěny v drážce ($R = 8 \text{ mm}$) podpůrného kroužku, a navíc zajištěny nylonovou klecí. Kontakt je mazán plastickým mazivem. Hodnota kontaktního Hertzova tlaku dosahuje hodnoty 4,6 GPa a otáčky dosahují hodnoty.

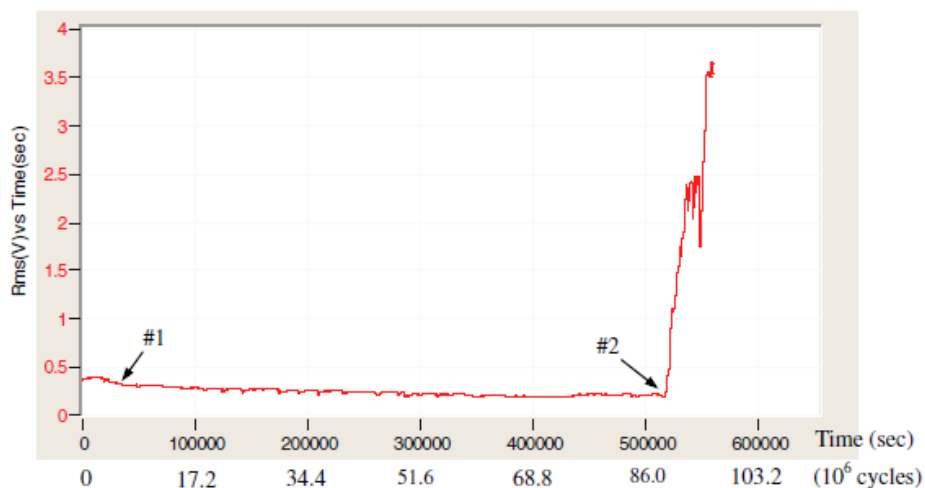


obr. 2-18 Zkušební stanice (frézka Bridgeport) [22]

Byly provedeny tři experimenty, při kterých byl zkoumán signál akustické emise (count, amplituda a RMS). Z výsledků vyplývá, že signál AE nejprve zachycuje fázi záběhu, kde se zkoumaný vzorek elasticky a plasticky deformuje. Tato fáze probíhá od 4 do 18 milionů cyklů. Tato odchylka může být způsobena nepatrnou odchylkou v drsnosti povrchu testovaných vzorků nebo odchylkou v nastavení podpůrného kroužku. Na obrázku 2-19 je znázorněn průběh jednoho z experimentů. Důležitými událostmi jsou především body označeny čísly 1 a 2. Bod 1 značí ukončení doby záběhu, na kterou navazuje ustálený stav (stabilizace signálu AE). Bod 2 ukazuje na vznik kritické události v podobě trhliny ložiskového materiálu, kdy ostře vzrostou hodnoty signálu AE.

tab. 2-5 Trvanlivost vzorků [22]

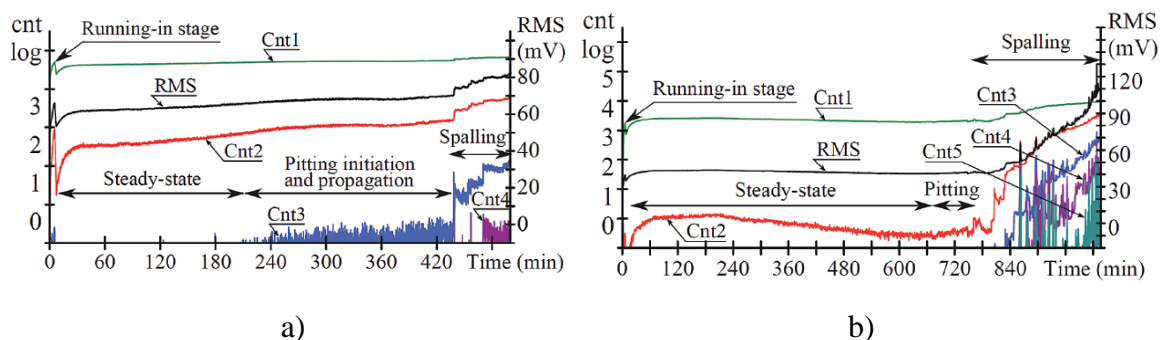
Číslo vzorku	Trvanlivost
G1	8588 min (89×10^6)
G2	17142 min (176×10^6)
G3	10833 min (223×10^6)



obr. 2-19 Energie signálu AE vs. čas [22]

Z publikace vyplývá, že amplituda akustické emise, RMS a energie signálu jsou citlivé na kontaktní poškození tohoto typu. Velká odchylka trvanlivostí souvisí s kvalitou povrchu broušeného materiálu, přičemž tyto mikroskopické koncentrátoři napětí jsou dominantní při vzniku trhliny.

Problematikou kontaktní únavy ložiskových materiálů se na Ústavu konstruování zabývá skupina pod vedením doc. Mazala. Studie popisující chování zkušebního vzorku na signálu akustické emise je shrnuta v článku [23]. Tento článek popisuje experimentální ověření kalené ložiskové oceli 16MnCr5, která je vystavena dvěma různým hodnotám zatížení.



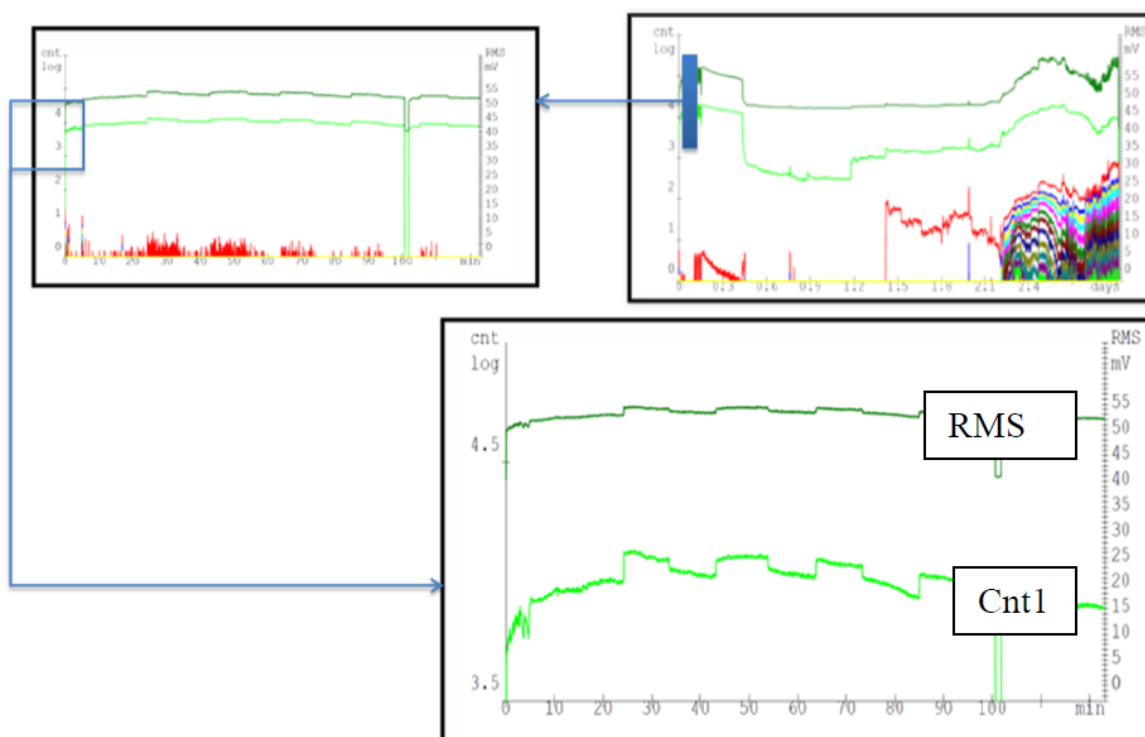
obr. 2-20 Průběh signálu AE při testu ložiskového materiálu pro zatížení: (a) 4000 N, (b) 2660 N [23]

Tato studie potvrzuje, že metoda akustické emise je schopna předčasně zachytit poškození testovaného vzorku v porovnání s vibracemi. Akustická emise detekovala záběh a šíření kontaktní únavy v oběžné dráze vzorku.

Dynamické zatěžování axiálních ložisek a plochých vzorků ložiskových ocelí

Dizertační práce Ing. Jiřího Dvořáčka, Ph. D. se zabývá přestavbou zkušební stanice AXMAT [24]. Tato práce se také okrajově věnuje problematice dynamického zatěžování axiálních ložisek, ovšem jen z hlediska možnosti využití upravené zkušební stanice pro tento druh zatěžování.

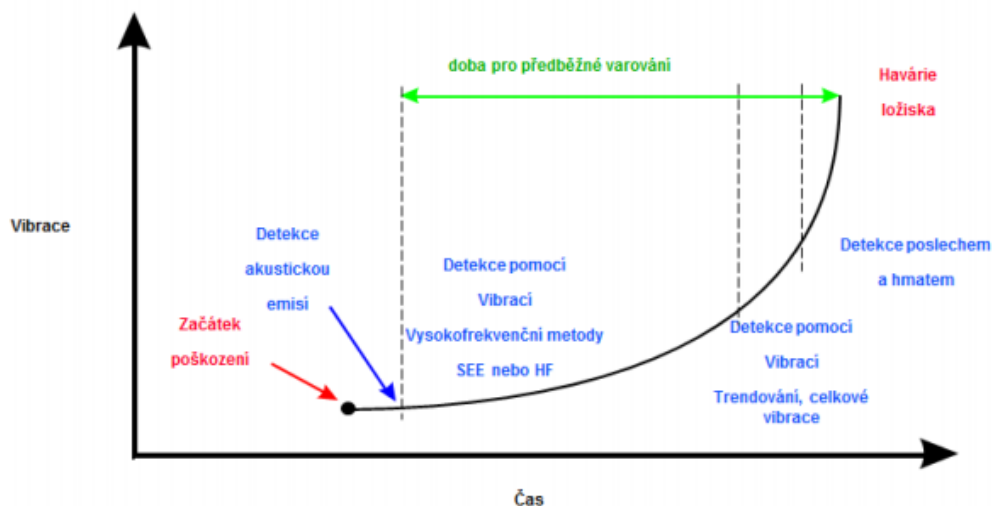
Zkušební vzorky byly zatěžovány dynamickým zatěžováním (kontaktní napětí $\sigma_{\text{Hertz1}} = 4500/4000 \text{ MPa}$ a $\sigma_{\text{Hertz2}} = 5000/4500 \text{ MPa}$) při konstantních otáčkách 1380 min^{-1} . Z této studie vyplývá, že akustická emise je vhodná pro měření dynamického zatěžování ložisek, protože poskytuje velmi podrobné údaje o chování zkušebního uzlu. Bohužel je zde popsán jen signál akustické emise a autor se nezabýval přesnějším vyhodnocením zkoumaného ložiska. Grafické znázornění průběhu zkoušky je znázorněno na obrázku 2-21.



obr. 2-21 Záznam zkoušky 5000/4500 MPa (změna po 10 min) [24]

2.6 Další metody diagnostiky ložisek

Pro diagnostiku stavu valivých ložisek existuje celá řada různých měřících metod. Kromě akustické emise, patří mezi další používané metody například termodiagnostika, hluková diagnostika či vibrodiagnostika.



obr. 2-22 Průběh poškození ložiska a jeho možnosti identifikace [25]

2.6.1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je jednou z hlavních metod pro odborné posouzení stavu sledovaných strojních součástí. Při vibrační diagnostice dochází k zachycení mechanického vlnění neboli vibrací, které vznikají v důsledku poškození zkoumané součásti [26]. Nejčastějšími měřenými veličinami jsou výchylka, rychlost a zrychlení. Sledováním těchto veličin je možné vyhodnotit aktuální stav součásti a lépe predikovat čas, který zbývá do ukončení životnosti zkoumané součásti [27].

Nejběžnějšími snímači vibrací jsou akcelerometry (senzory zrychlení), což jsou seismické zařízení, které vyhodnocují absolutní vibrace měřeného zařízení. Akcelerometry jsou tvořeny pomocí piezoelektrického krystalu, který svou deformací vytváří elektrický náboj, jenž je dále zpracován. Existují však i další druhy snímačů jako např. snímače výchylky (bezdotykové sondy) nebo snímače rychlosti (velometry).

2.6.2 Hluková diagnostika

Jedná se o nedestruktivní bezdotykovou metodu, která udává informaci o stavu zařízení pomocí hluku. Pod pojmem hluk je označován nežádoucí zvuk, jehož frekvenční pásmo je od 20 Hz do 20 kHz [27]. Hluk vzniká díky třecím silám ve styku součástí a mikroskopickým silovým impulsům, které jsou způsobeny vzájemným pohybem drsných nebo nepřesně vyrobených součástí. Samotný hluk se šíří vzduchem, pevnou látkou nebo i kapalinou. Nevýhodou hlukové diagnostiky jsou interference a parazitní odrazy v uzavřených prostorech, ale také to může být hluk okolních objektů.

2.6.3 Termodiagnostika

Termodiagnostika je nedestruktivní metoda, která je založena na zobrazení a vyhodnocení teplotního pole na povrchu testovaného tělesa [27]. Termodiagnostika se lze rozdělit na dva přístupy, a to na dotykovou a bezdotykovou metodu.

Při dotykové metodě se pro měření teplot využívá indikátory na bázi kapalných krystalů, které jsou zaznamenány CCD kamerou.

Při bezdotykové metodě se ke snímání používá termografická kamera. Podstatou této metody je rozdílnost snímané povrchové teploty, podle které je možné určit místo poruchy. Jelikož v důsledku tření či jiných degradačních procesů se zvyšuje teplota materiálu, je možné právě pomocí termokamery zachytit poškození součástí.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Valivá ložiska jsou velmi významnými prvky různých strojů a zařízení, jelikož značným způsobem přispívají ke snazšímu rozpořívování jednotlivých součástí. Z toho důvodu, že nacházejí uplatnění v široké oblasti, je třeba přesně predikovat trvanlivost ložiska, aby nedošlo k jeho selhání a následnému poškození celého zařízení. Pro přesnější predikci trvanlivosti jsou prováděny trvanlivostní zkoušky ložiskových materiálů, a to z důvodu stanovení kvality ložiskového materiálu, ověření tepelného zpracování či zkoumání vlivů, jež ovlivňují vznik kontaktní únavy. Tímto vlivem může být také myšlena skoková změna zatížení, která se opakuje řádově v rozmezí hodin.

Předkládaná diplomová práce se zabývá otázkou, zda má skokové zatěžování vybraného ložiskového materiálu vliv na výslednou trvanlivost vzorku ložiskové oceli, a zda je mezní stav kontaktní únavy dominantní. Pro zjištění tohoto mezního stavu je použito zkušebních stanic AXMAT z důvodu dostupnosti na Ústavu konstruování, přičemž je během experimentu snímán signál akustické emise a intenzita vibrací. Jedna série měření se skládá z 20 experimentů, pro které je následně určena základní trvanlivost materiálu dle Weibullova rozdělení.

Jedním z největších problémů při řešení této diplomové práce lze očekávat ve správném nastavení aparatury akustické emise, a to z toho důvodu, aby byly správně zachyceny počáteční fáze mezního stavu poškození vzorku. Při špatném nastavení mohou být zaznamenávány i okolní jevy (např. srážky kuliček), což povede ke znehodnocení signálu. Další problematickou oblastí je samotné vyvozování skokové změny zatížení. Je třeba najít vhodnou metodiku, aby bylo možné dosáhnout opakovatelnosti experimentů. Také je nutné zprovoznit hydraulickou variantu zkušebního zařízení, která je momentálně nefunkční. Závěrem je třeba zmínit, že problémem může být také identifikace prvotního poškození materiálu, jelikož na signál akustické emise má vliv skoková změna zatížení, což může vést ke zkreslení signálu AE.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z provedené rešeršní části je zřejmé, že experimentální ověření ložiskových materiálů probíhá jen při statickém zatěžování. Autoři zabývající se touto problematikou se zaměřují především na signál akustické emise a pokouší se co nejlépe zachytit prvotní poškození ložisek, přičemž jsou používány obdobné varianty zkušebních zařízení, jako je k dispozici

na Ústavu konstruování. Některé experimenty jsou prováděny na celých ložiscích (nejsou použity modelové zkoušky na částech ložisek), což by ovšem nemělo hrát roli v zachycení primárního poškození.

Z počátku je rešerše zaměřena na problematiku určování trvanlivosti, tedy kontaktní únavy ložisek. Do této části spadá i experimentální testování ložisek nebo jejich jednotlivých komponent. Experimentální zatěžování ložiskových materiálů při modelových zkouškách je nejsnadnějším způsobem získání informace o trvanlivosti valivého kontaktu. Pro tyto zkoušky existují různá zařízení, přičemž každé z nich se liší svou konstrukcí a jsou vhodná pro odlišný typ experimentů.

Druhá část rešeršní části se zabývá metodou akustické emise. Aplikací metody akustické emise je možné mnohem dříve zachytit prvotní poškození (vznik kontaktní únavy) ložisek, a to ještě dříve, než se začne poškození projevovat zvyšujícími se vibracemi, či zvýšením teploty nebo intenzity hluku. Důvodem je fakt, že akustická emise pracuje při mnohem vyšších frekvencích než frekvenční rozsah vibrodiagnostiky. Z toho důvodu bude AE použita pro monitorování zkušební vzorku, ale i proto, že je schopna zachytit skokovou změnu zatížení.

V rámci rešerše nebyla nalezena studie zabývající se problematikou skokové změny zatížení ložisek či jejich částí, tudíž je třeba tuto problematiku podrobněji prozkoumat a zaměřit se na ni. Bližším zkoumáním tohoto problému bude možné lépe predikovat chování ložisek (ložiskových materiálů) při tomto zatěžování, což umožní lepší dimenzování ložisek.

3.3 Cíl diplomové práce

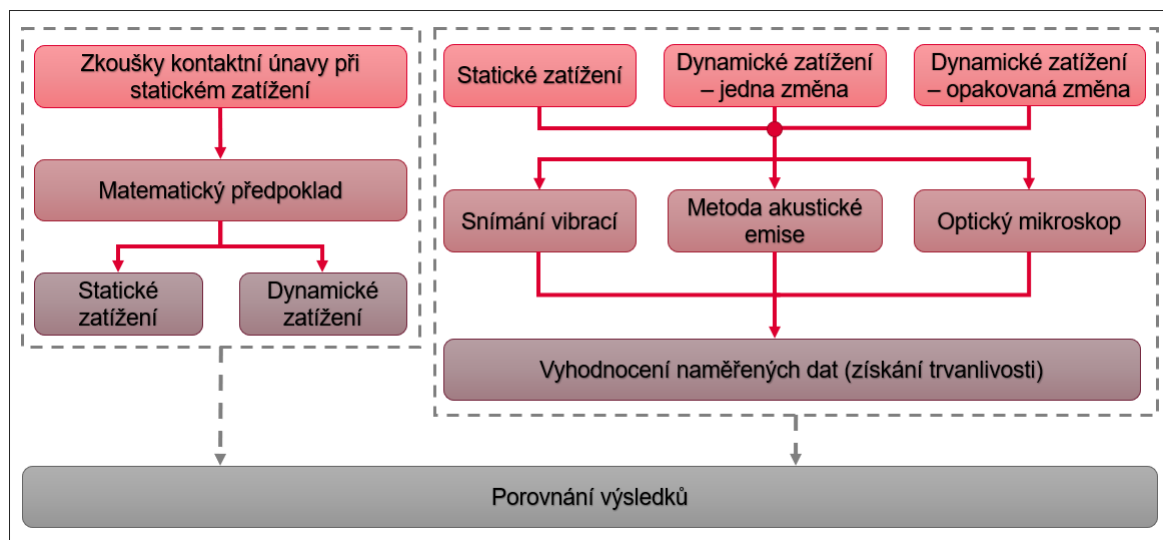
Cílem diplomové práce je experimentální ověření ložiskového materiálu (ocel 100Cr6) na plochem vzorku, který je vystaven skokovému zatěžování, přičemž výsledkem je určení základní trvanlivosti materiálu dle Weibullova rozdělení. Získané hodnoty trvanlivosti stanoví, který průběh zatěžování je nejnebezpečnější.

Ke splnění hlavního cíle diplomové práce je nutné vyřešit následující dílčí cíle:

- Navrhnout experimenty s dynamickou změnou zatížení (skokovou změnou zatížení) zkušební uzlu
- Rozbor signálu akustické emise
- Vyhodnocení naměřených dat

4 MATERIÁL A METODY

V následující kapitole je popsán postup měření experimentální části. Dále tato kapitola obsahuje popis experimentálního zařízení či geometrie zkušebního vzorku a jeho materiál. Na konec je popsáno hardwarové vybavení měřicí aparatury a také softwarová část, která slouží k zachycení dat a jejich vyhodnocení.



obr. 4-1 Schéma průběhu řešení DP

Schéma naznačuje jednotlivé kroky, jakými je postupováno při řešení této diplomové práce. Díky rešeršní části bylo zjištěno, jak lze teoreticky určit trvanlivost ložiska. Na základě těchto poznatků byly vytvořeny výpočtové modely, jež odpovídají jednotlivým trendům zatížení. Dle odpovídajících výpočtů bylo provedeno experimentální ověření, čímž bylo zjištěno, jak přesný teoretický předpoklad byl.

Z rešerše dále vyplývá, že metoda akustické emise je vhodná metoda pro sledování porušení valivých ložisek. V této práci ovšem tato metoda slouží především pro zachycení průběhu experimentů. Dále bylo v teoretické části zjištěno, jaké jsou prováděny testy ložisek za použití metod AE, a že jsou tyto experimenty prováděny jen při konstantních (statických) podmínkách.

Na rešeršní část je navázáno experimentálním měřením, které se skládá ze tří sérií experimentů (při statickém zatížení, s jednou skokovou změnou zatížení a s opakovanou změnou zatížení). Z důvodu dosažení správnosti výsledků, je nutné každý experiment 20x opakovat, aby byla každá série měření dostatečně podložena a bylo ji možné statisticky vyhodnotit. Během experimentů je zaznamenávána doba do poruchy a signál akustické emise (Counts, RMS).

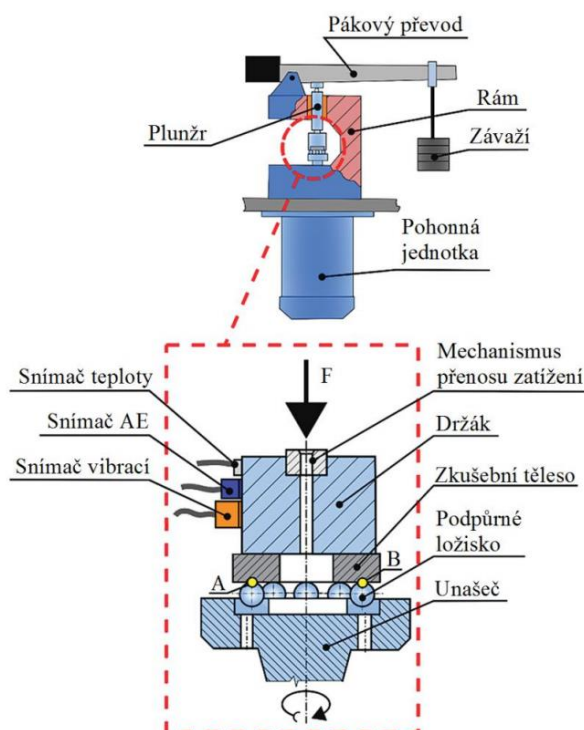
Na úplný závěr experimentální části jsou získaná data vyhodnocena a porovnána s matematickým předpokladem, čímž je splněn hlavní cíl této diplomové práce. Přínos této diplomové práce je především v rozšíření problematiky dynamicky zatěžovaných ložiskových materiálů, čímž se doposud nikdo nezabýval. Díky tomu je tato diplomová práce rozšířením této problematiky.

4.1 Zkoušky kontaktní únavy ložiskového materiálu

Zkoušky kontaktní únavy byly provedeny na zkušebním zařízení AXMAT. V současnosti je zkušební stanice AXMAT jedna ze zkušebních stanic, která je dostupná v laboratořích na Ústavu konstruování VUT FSI v Brně. Během měření je snímána hladina vibrací a signál akustické emise, který slouží pouze pro zachycení průběhu.

4.1.1 Zkušební zařízení AXMAT

Toto zkušební zařízení slouží k ověřování jakosti materiálu a způsobu jeho tepelného zpracování [28]. Dále je toto zařízení možné použít pro výzkum vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů, zkoušky trvanlivosti probíhající za vyšších teplot, a především na testování vzniku a šíření kontaktní únavy u axiálních ložisek.



obr. 4-2 Zkušební zařízení AXMAT [14]

Z obrázku 4-2 je patrný základní princip zkušebního zařízení AXMAT. Zkušební vzorek v podobě disku je přichycen šroubem k držáku, který je zatěžován axiální silou. Tato síla je vyvolána pákovým mechanismem, který je opatřen závažím, kterým je možné regulovat velikost síly. Díky této síle je zkušební vzorek přitlačován na odvalující se libovolný počet kuliček. Podpůrný kroužek, který vykonává rotační pohyb je uchycen k unášeci ve hřídeli pohonu. Dále je na držáku umístěno několik senzorů, a to především z důvodu zajištění potřebných dat k vyhodnocení testu. Konkrétně se jedná o snímač vibrací (akcelerometr), který reaguje na první makro poškození zkoumaného materiálu a v případě vzniku pittingu tento snímač odstaví zkušební stanici. Pro případ selhání akcelerometru nebo při extrémním vzniku tepla v kontaktu je mezi plunžrem a držákem umístěna tepelná spojka (polyamidová vložka), která díky teplotní dilataci odlehčí zatížení. Dále je na držáku umístěn snímač teploty a dva snímače akustické emise. Oblast kontaktu, je také možné externě vyhřívat, přivádět mazivo apod. přičemž záleží na účelu konané zkoušky.

Základní rozměry zkušebních vzorků, rozsah velikosti zatížení a otáčky vřetene, kterých je zkušební stanice AXMAT schopna dosáhnout, jsou shrnuty v tabulce 4-1.

tab. 4-1 Parametry zařízení AXMAT [14]

Rozměry zkušebního disku		Velikost axiálního zatížení		Otáčky vřetene
Vnější průměr	Tloušťka	Standardní provoz	Krátkodobé maximální	-
25-80 mm	5-15 mm	2 000-4 000 N	10 000 N	0-1 380 min ⁻¹

Dále pro zkoušky kontaktní únavy byla použita inovovaná zkušební stanice AXMAT, kde je zatížení ložiska vyvozováno pomocí hydraulického válce. Tato zkušební stanice se na ústavu nachází již několik let, ovšem k ní chyběla potřebná elektronika. V průběhu této diplomové práce byla chybějící elektronika dokoupena, tudíž se mi naskytla možnost si výrazně zjednodušit práci užitím tohoto zařízení a zároveň byla otestována jeho funkčnost.



obr. 4-3 Zkušební zařízení AXMAT (úplně vpravo hydraulická varianta)

4.1.2 Software

K řízení zkušebních stanic AXMAT je použit software, který je nahrán v technickém počítači (PLC) v rozvodové skříni. Tento software umožňuje nastavení citlivosti snímače vibrací a hladiny intenzity vibrací pro ukončení experimentu při vzniku kontaktní únavy. Dále program měří dobu trvání jednotlivých experimentů, a jakým způsobem bylo testování ukončeno (přetečení vibrací přes stanovenou hladinu, zastaveno uživatelem, central stop). Software také umožňuje ovládat přtlak a otáčky hydraulické varianty. V současné době se jedná o zkušební provoz, a je velice pravděpodobné, že do budoucna proběhne vylepšení tohoto softwaru. Vylepšením může být např. ukládání průběhu vibrací nebo záloha dat, které by v případě výpadku elektřiny byly uchovány.

	Bearing 1	Bearing 2	Bearing 3	Bearing 4	Bearing 5
Status	ready	running	ready	stopped by user	ready
RMS acceleration	0	0	0	0	0
RMS acc limit	200	140	140	60	140
Start time	01/01/1970 00:00:00	02/13/2019 13:08:22	02/13/2019 13:08:22	02/13/2019 13:09:03	01/01/1970 00:00:00
Stop time	01/01/1970 00:00:00	01/01/1970 00:00:00	01/01/1970 00:00:00	02/13/2019 13:13:09	01/01/1970 00:00:00
Running time	0	0	0	0	0
Temperature	0	0	0	0	0
Loading force	0	0	0	0	0
RPM	0	0	0	0	0
Actual Time	02/13/2019 13:15:14				

Main Menu

Bearing 1

Bearing 2

Bearing 3

Bearing 4

Bearing 5

Total Stop

obr. 4-4 Prostředí softwaru pro ovládání stanic AXMAT

Akcelerometr zařízení AXMAT

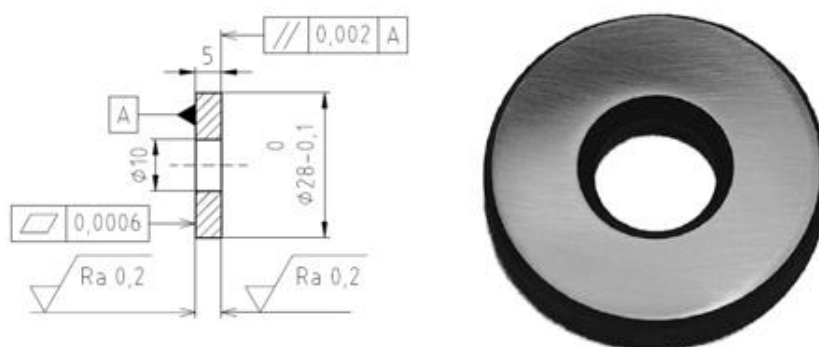
V současné době jsou na držácích zkušebních vzorků připevněny snímače zrychlení od firmy B&R z důvodu kompatibility s technickým počítačem, který je od téhož výrobce. Upevnění je provedeno pomocí šroubu M8, přičemž bylo nutné provést úpravu těchto držáků, jelikož se jedná o nové senzory a doposud nebyly používány.

tab. 4-2 Technické parametry akcelerometru

Citlivost:	100mV/g ± 10 %
Rozsah:	± 50 g
Rezonanční frekvence:	22 kHz
Teplotní rozsah použití:	-55 °C až 140 °C
Materiál:	Nerezová ocel

4.1.3 Zkušební uzel

Zkušební uzel je navržen tak, aby doba zkoušky byla co nejkratší. Zkušební uzel se skládá z kombinace ložiskového kroužku, kuliček a zkušebního vzorku. Podpůrný kroužek s drážkou je použit z komerčně dostupného kuličkového ložiska SKF 51102. Dle tohoto ložiskového kroužku byly připraveny materiálové vzorky, jejichž tvar odpovídá disku, přičemž podrobnější rozměry a tvar je možné vidět na obrázku 4-5. Plocha, která je určena k experimentu je broušena a následně leštěna na drsnost $R_a < 0,2$. Zkušební uzel dále obsahuje 21 kuliček o průměru 3,175 mm, přičemž kontakt mezi kuličkami a diskem je mazán plastickým mazivem.



obr. 4-5 Geometrie zkušebního vzorku [14]

Mazivo

Kontakty disků ložiska a kuliček byl mazán plastickým mazivem MOGUL LV3. Jedná se o komerčně dostupné mazivo pro valivá a kluzná ložiska, případně může být využito pro mazání malých ozubených převodů [29]. Toto mazivo je vyrobeno z ropných základových olejů, přičemž je zpevněno lithným mýdlem. Barva maziva je žlutá až žlutohnědá a mazivo má poloměkkou až střední konzistenci.

4.2 Experimentální materiál

Pro experimentální část tedy pro zkoušky kontaktní únavy byla použita ložisková ocel 100Cr6. Jedná se o ocel, která dle dřívější normy ČSN 41 4109 nese označení 14 109 [30]. Je to tedy chromovaná ocel, která je hojně využívána pro výrobu valivých ložisek, jak pro valivé elementy (kuličky do průměru 25 mm, válečky, kuželíky do průměru 18 mm), tak pro ložiskové kroužky valivých ložisek (do tloušťky stěny 16 mm). Běžně se tato ocel také používá pro výrobu polotovarů (tyče válcované za tepla nebo tažené za studena, bezešvé trubky tvářené za tepla atd.). Chemické složení této oceli je uvedeno v tabulce 4-3.

tab. 4-3 Chemické složení dle normy [hm %] [30]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S
0,90 - 1,10	0,30 - 0,50	0,15- 0,35	1,30- 1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	Max 0,027	Max 0,030

Tepelné zpracování

Ocel je vhodná k přímému kalení do vody (790 °C – 820 °C) nebo do oleje (820 °C – 850 °C). Dále je možné normalizační žíhání nebo žíhání na měkko, ale také popouštění. Optimální tloušťka nebo průměr pro zušlechtnění je 20 mm. Díky tepelnému zpracování a danému chemickému složení jsou součásti z této oceli schopny odolávat opotřebení, z důvodu velmi tvrdého povrchu.



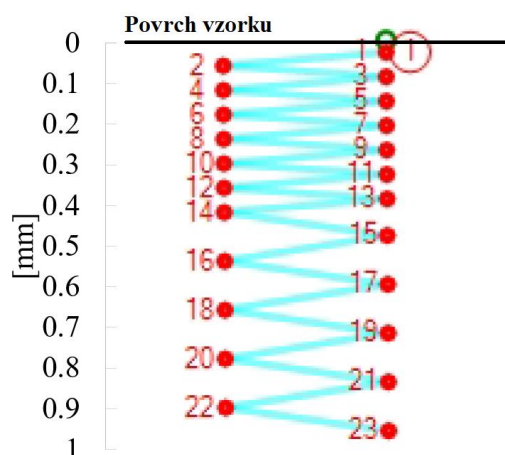
obr. 4-6 Mikrostruktura materiálu před zakalením (vlevo), po zakalení (vpravo) [31]

Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti se odvíjí podle toho, jak byla ocel tepelně zpracována. Z toho důvodu se pohybují v určitém intervalu. Pro mez pevnosti R_m tedy platí, že se pohybuje od 608 MPa do 765 MPa. Mez kluzu R_e je 441 MPa, tvrdost před zakalením je až 225 HB (20 HRC) a tažnost 18 % [30].

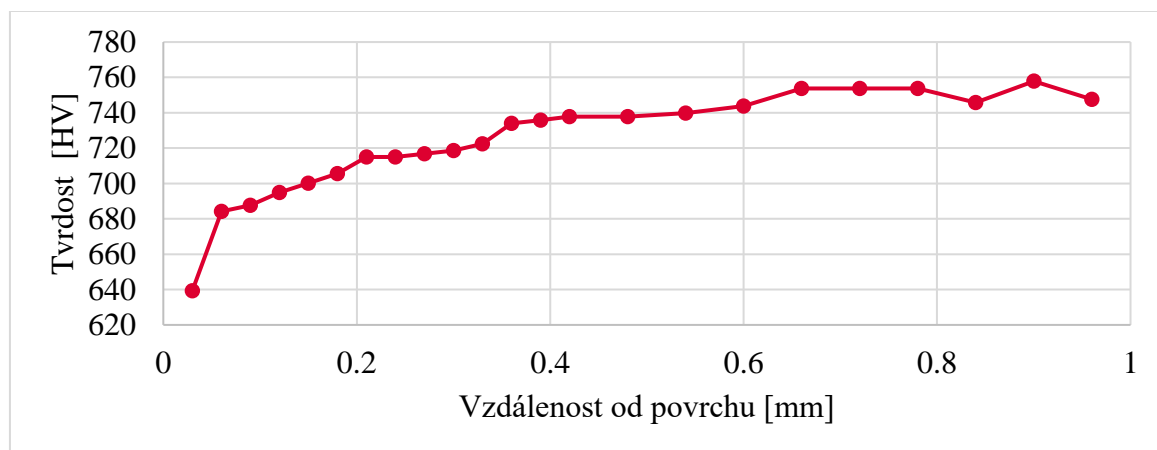
Experimentální vzorky byly soustruženy z tyčového polotovaru. Následně byly tepelně zpracovány (martenziticky kaleny) a broušeny na žádanou drsnost. Následně je provedeno popouštění při teplotě 160 °C po dobu 4 hodin [14].

Pro zjištění skutečné tvrdosti bylo několik vzorků podrobeno metalografické analýze. Vzorky byly tedy rozřezány a byl vytvořen metalografický výbrus. Tvrdost byla naměřena podle Vickerse – HV0,3. Poloha jednotlivých míst indentace je znázorněna na obr. 4-7.



obr. 4-7 Poloha jednotlivých vpichů pro určení tvrdosti

Díky této analýze bylo tedy zjištěno, že vybraná ocel 100Cr6 dosahuje různých hodnot tvrdosti. Hodnota tvrdosti se pohybovala od 639 HV_{0,3} do 747 HV_{0,3}, což odpovídá 57 - 62 HRC. Vzorky tohoto materiálu jsou tedy na povrchu měkčí než v jádře. Průběh tvrdosti od povrchu vzorku do vzdálenosti 1 mm je znázorněn na obrázku 4-8.



obr. 4-8 Ukázka změny mikrotvrdosti zkušebního vzorku

Na obrázku 4-9 je zobrazen řez vzorku oceli 100Cr6. Na povrchu je možné pozorovat oduhličení oceli (světlá oblast u povrchu), které bylo pravděpodobně způsobeno zakalením.



obr. 4-9 Struktura materiálu oceli 100Cr6

4.3 Akustická emise

Pro získání signálu akustické emise a také pro jeho následné vyhodnocení byl použit měřicí systém od firmy Dakel. Hlavním důvodem užití tohoto systému je, že tato měřicí aparatura (včetně softwaru) je k dispozici v laboratořích kontaktní únavy na Ústavu konstruování.

4.3.1 Systém Dakel XEDO (hardware)

Jedná se o univerzální měřicí a diagnostický systém, který má širokou škálu uplatnění, především při měření fyzikálních veličin, jako např. napětí, frekvence, tlak či teplota [32]. Tento měřicí systém má velikou výhodu v tom, že je možné do něj vložit různé typy měřících a komunikačních jednotek, které jsou schopny pracovat ve skupinách, ale také nezávisle na sobě, díky čemuž je možné sestavit i rozsáhlé diagnostické systémy. Komunikace těchto jednotek probíhá po univerzální vysokorychlostní sběrnici, která poskytuje všem připojeným jednotkám informace o přesném čase. Komunikace probíhá pomocí ethernetového rozhraní, díky čemuž je možné připojit toto zařízení, ke kterémukoliv počítači, který je opatřen tímto výstupem.



obr. 4-10 Systém Dakel XEDO

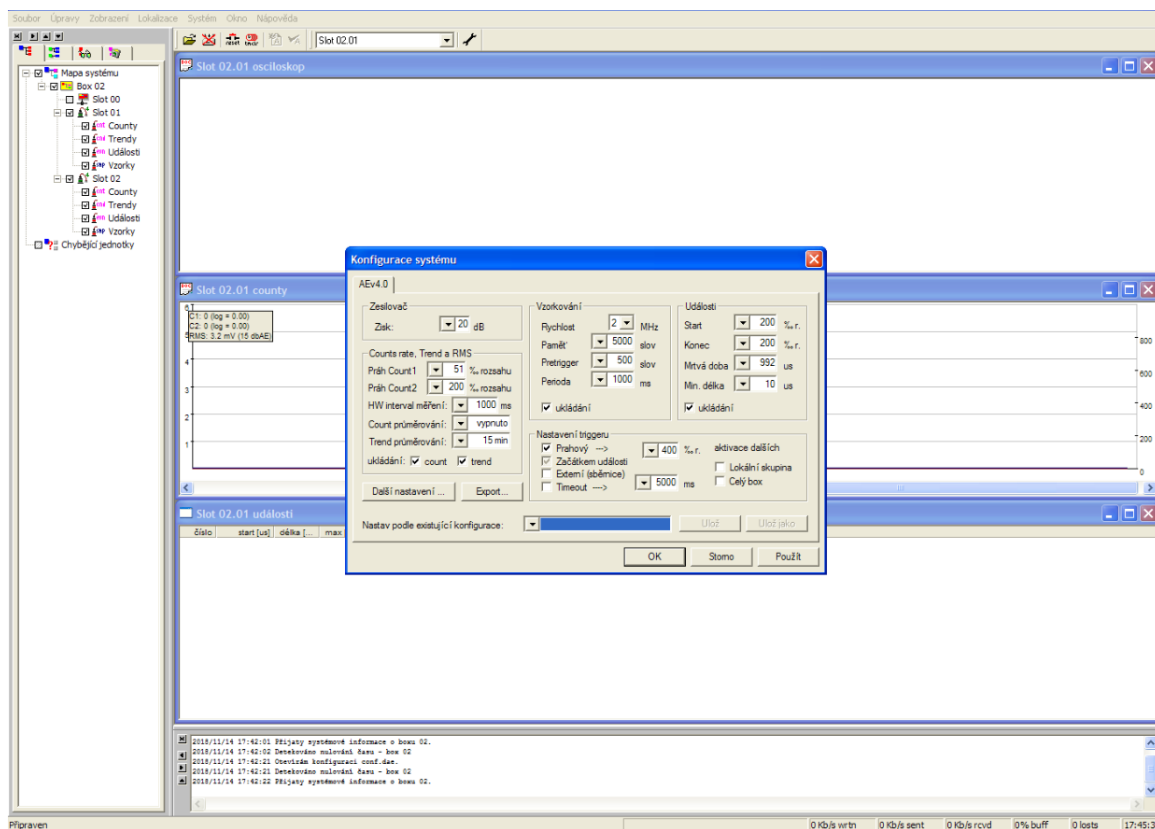
Měřicí kanálová jednotka XEDO je navržena pro připojení pasivních piezokeramických snímačů (bez předzesilovače) nebo aktivních snímačů s vestavěným předzesilovačem. Další technické parametry jsou zobrazeny v tabulce 4-4.

tab. 4-4 Technické parametry kanálových jednotek [32]

Rozměry:	100x220x23 mm
Hmotnost:	200 g
Napájení:	+5 V DC / 200 mA; +12 V DC/ 100 mA
Frekvenční rozsah:	100-800 kHz
Vzorkovací frekvence:	2, 4, 8 MHz
Rozlišení A/D převodníku:	10 bitů
Vstupní rozsah po zesílení:	± 2400 mV
Rozsah zesílení:	0–40 dB, nebo 0–80 dB s krokem 1 dB
Rozsah pracovních teplot:	+5 - +40 °C
Vstupy a výstupy:	Konektor BNC pro snímač

4.3.2 Software Deamon a Daeshow

Softwarová část systému XEDO se jmenuje Dakel Deamon. Naopak pro následné vyhodnocení měření Dakel Daeshow [33]. Díky programu Deamon je umožněno v reálném čase sledovat akustické události v probíhajícím měření. Prostřednictvím tohoto programu je tedy možné řídit a komunikovat s měřícím hardwarem XEDO. V nastavení programu existuje velké množství konfigurací, kterými lze nastavit parametry měření. Konkrétně je možné tedy nastavit hodnotu prahů, vzorkovací frekvencí, hodnoty událostí AE atd. Všechny získaná data je možné díky tomuto programu ukládat na disk počítače.



obr. 4-11 Prostředí softwaru Deamon

Naměřená data mohou být následně vyhodnocena offline pomocí programu Daeshow. Software Daeshow podporuje grafické zpracování naměřených dat a také umožňuje transformovat signál pomocí spektrální analýzy.

4.3.3 Snímače AE

Pro měření akustické emise byly použity snímače, které jsou kompatibilní s dostupným měřicím systémem. Obecně, jak již bylo řečeno, se jedná o snímače s piezokrystalem.

Snímač Dakel MDK-13

Pro všechny měření, které byly provedeny v této diplomové práci, byly použity snímače AE tohoto typu. Výhodou těchto snímačů je dotyková plocha opatřená permanentním magnetem, díky čemuž je zajištěna snadná manipulace, jelikož snímač drží sám na ocelovém povrchu. Existují dva typy provedení, a to s vestavěným předzesilovačem nebo bez něj. V diplomové práci byly použity obě varianty provedení.



obr. 4-12 Snímač Dakel MDK-13 [32]

tab. 4-5 Technické parametry snímače Dakel MIDI [32]

Rozměry:	průměr 13 mm, výška 11 mm
Materiál pouzdra:	Nerezová ocel
Přípevnění snímače	Magneticky
Provedení vývodu:	Radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1,7 mm s BNC konektorem
Materiál piezoelementu:	PTZ třída 200
Provozní teplota:	-20 °C až +95 °C

Předzesilovač

Z důvodu, že některé snímače AE nemají vestavěný předzesilovač a výstupní napětí dosahovalo poměrně nízkých hodnot, byl použit předzesilovač externí. Dalším důvodem, proč byl užit předzesilovač, bylo získání jasnějších výsledků při měření. Použitý předzesilovač byl opět od firmy Dakel (typ MDK-17) [32]. Tyto předzesilovače jsou vyrobeny hybridní technologií a jsou napájeny výstupním koaxiálním kabelem z příslušného zařízení (v případě této práce Dakel XEDO). Zesílení tohoto předzesilovače se pohybuje v pásmu od 10 do 60 dB. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 4-6.



obr. 4-13 Předzesilovač Dakel [32]

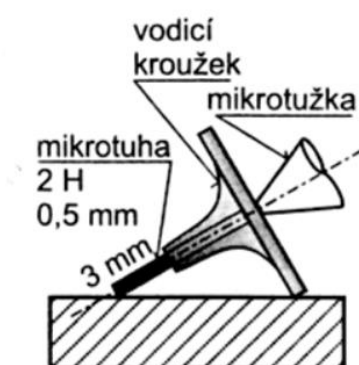
tab. 4-6 Technické parametry předzesilovače Dakel [32]

Zisk:	Cca 35 dB
Vstupní impedance:	150 k Ω /14pF
Napájecí napětí:	12 V až 35 V
Způsob napájení:	Po výstupním koaxiálním kabelem
Spotřeba proudu:	6 mA (při 12 V), 7 mA (při 35 V)
Provozní teplota:	-20 °C až +85 °C
Vstup a výstup:	BNC konektor

4.4 Standardní metodika měření

Standardně jsou experimentální zkoušky vzorků ložiskových materiálů prováděny při statickém zatížení a při konstantních otáčkách větších než 1000 min^{-1} [34]. V této diplomové práci bylo provedeno měření dle těchto standardních podmínek, na které bylo navázáno experimenty s dynamickou změnou v podobě skokových změn zatížení.

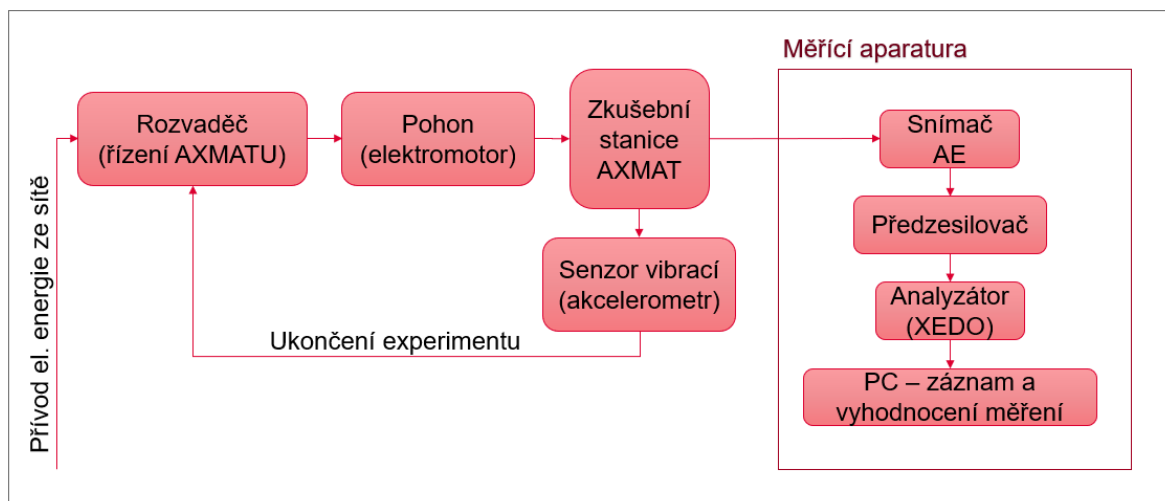
Každý experiment se skládá z 25 vzorků. Na dvaceti z nich je provedena zkouška kontaktní únavy a zbylých pět slouží k ověření tvrdosti a metalografické analýze. Před samotným měřením kontaktní únavy je zkušební vzorek zbaven konzervačního oleje a provedena vizuální kontrola. Následně je vzorek umístěn do držáku a je nutno připravit podpůrný kroužek axiálního ložiska SKF 51102 s 21 kuličkami o průměru 3,175 mm. Dále je přidáno plastické mazivo ($2 \pm 0,2 \text{ g}$). Všechny zmíněné komponenty jsou umístěny do zkušebního stroje a k držáku vzorku jsou upevněny senzory AE, teploty a akcelerometr. V softwaru Deamon je nastavena konfigurace záznamu AE. Záznam je dále ukládán do předem nastaveného adresáře. Ještě před spuštěním měření je třeba provést kalibraci snímačů. Ta se provádí pomocí Hsu-Nielsenova testu (Pen-test) [27]. Zlomením mikrotuhy je vytvořena umělá emisní událost, která se projeví v signálu AE. „Pen-test“ slouží především pro ověření detekce signálu AE a umožňuje nastavení měřící aparatury ještě před spuštěním experimentu.



obr. 4-14 „Pen-test“ [27]

Dále je třeba se pomocí VNC vieweru připojit do PLC jednotky, kde je potřeba nastavit hladinu vibrací pro ukončení experimentu. Poté je nutné zkušební uzel zatížit (těsně před spuštěním pohonu) a je možné spustit pohon. Na závěr je třeba zkušební uzel zkontrolovat jeho pootočením, a pokud se pootočení jeví jako hladké, je zkušební zařízení AXMAT správně nastaveno [14], [34].

Princip, jak celé měření probíhá a jak jsou kontrolovány aktuální podmínky v kontaktu, je znázorněn na obr. 4-15.



obr. 4-15 Schéma uspořádání měřicího řetězce

4.4.1 Experimentální podmínky

Experimentální podmínky lze charakterizovat velikostí kontaktního tlaku mezi kuličkami a zkušebním vzorkem a také rychlostí otáček. Během experimentů se standardně používá takové zatížení, kdy hodnota Hertzova tlaku dosahují hodnot 3000, 4000 nebo 5000 MPa [34]. Nejčastěji se měření provádí právě při kontaktním tlaku 5000 MPa. Otáčky vždy dosahují konstantní hodnoty 1380 min^{-1} .

4.4.2 Podmínky zkušebního uzlu

Zkušební uzel se skládá z podpůrného kroužku axiálního ložiska, kuliček a zkušebního vzorku. Jelikož je známa pouze dynamická únosnost kuličkového ložiska, je třeba vypočítat, také dynamickou únosnost vzorku, který je v kontaktu s valivými elementy v podobě kuliček. Tato hodnota je dále použita pro výpočet trvanlivosti zkušebního vzorku. Bylo tedy vypočítáno zatížení jedné kuličky ve zkušebním uzlu, které bylo následně přepočítáno na hodnotu kontaktního tlaku, a to ve dvou kritických místech, které odpovídají právě styku kuličky se zkušebním vzorkem a styku kuličky s podpůrným kroužkem ložiska. Pro výpočet byly použity materiálové vlastnosti a rozměry zkušebního uzlu, jejichž hodnoty jsou v tabulce 4-7. Výpočet byl proveden pro zatížení 2609 N, což dle tabulek odpovídá kontaktnímu tlaku 5000 MPa.

tab. 4-7 Parametry zkušebního uzlu

Poissonova konstanta	0,3
Modul pružnosti v tahu	210 GPa
Průměr kuličky	3,175 mm
Průměr drážky ložiskového kroužku	4,5 mm
Axiální síla působící na jednu kuličku	124,6 N

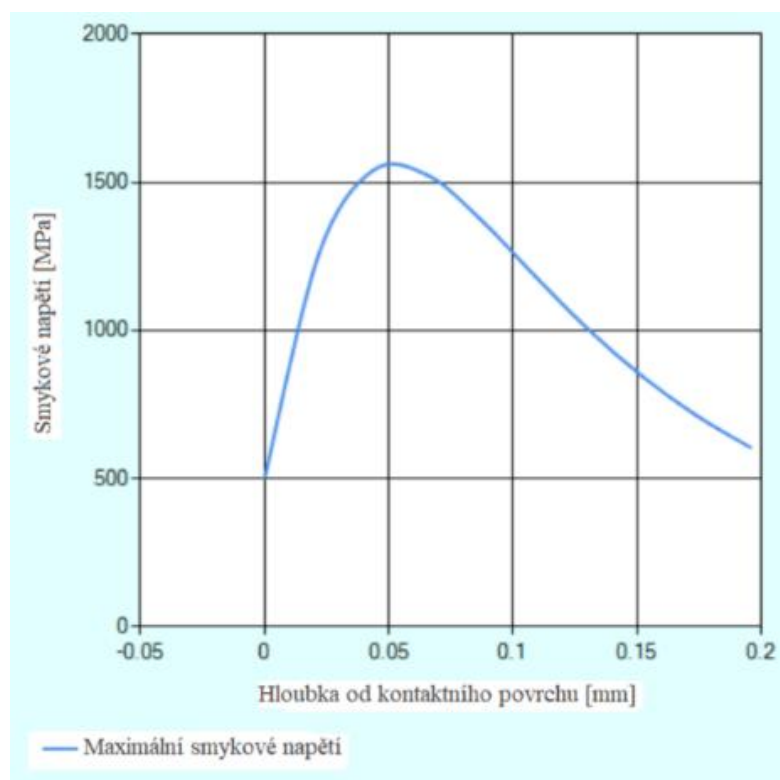
V tabulkách 4-8 a 4-9 jsou uvedeny hodnoty analytického výpočtu pro oba zkoumané kontakty.

tab. 4-8 Kontakt kulička-zkušební vzorek

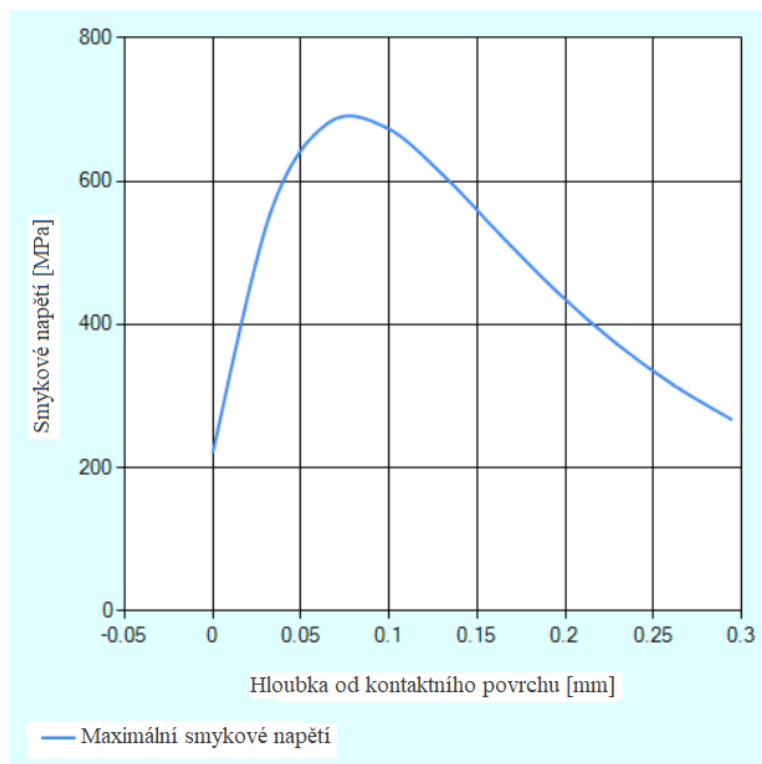
Maximální Hertzův kontaktní tlak	5031,5 MPa
Maximální smykové napětí	1559,9 MPa
Hloubka maximálního smykového napětí	0,052 mm

tab. 4-9 Kontakt kulička-ložiskový kroužek

Maximální Hertzův kontaktní tlak	2226,9 MPa
Maximální smykové napětí	690,4 MPa
Hloubka maximálního smykového napětí	0,079 mm



obr. 4-16 Průběh smykového napětí v kontaktu kulička-vzorek



obr. 4-17 Průběh smykového napětí v kontaktu kulička-ložiskový kroužek

Díky tomuto výpočtu bylo zjištěno, že Hertzův kontaktní tlak ve zkoumaných oblastech je v poměru 2226,9 MPa ku 5031,5 MPa, což znamená, že hodnota základní dynamické únosnosti vzorku je 0,443 ze základní dynamické únosnosti axiálního ložiska ZKL 51100. Pro ověření správnosti výsledků byl následně proveden výpočet pro nižší hodnotu zatížení, ovšem poměr kontaktních tlaků se nezměnil, tudíž lze tyto výsledky považovat za správné.

4.5 Vyhodnocení získaných dat

4.5.1 Akustická emise

Pro prohlížení naměřených dat je možné použít software Daeshow, který je dodáván firmou Dakel. Tento program umožňuje vykreslení získaných dat v podobě jednoduchých grafů, čímž je možné poměrně rychle vyhodnotit provedená měření. Z důvodu omezené editace grafů v tomto programu je možné získaná data dále exportovat v podobě binárních dat do textového souboru. Díky tomu mohou být dále zpracovány aplikacemi typu Excel, Matlab či Maple. Exportované soubory jsou čtyř typů (cnt.txt, cnt16.txt, evn.txt, smp.txt). Pro popis kontaktní únavy je nejlepší vykreslit efektivní hodnotu signálu (RMS) a překmity přes jednotlivé prahové úrovně signálu (Counts), které jsou součástí souborů cnt.txt a cnt16.txt.

Pro popis stavu zkoumaného vzorku byla použita dostupná metodika měření vycházející z řešeršní části. Vyhodnocení proběhlo na základě zkoumání vykreslených grafů. Okamžik nárůstu signálu je spojen s počátkem vzniku kontaktní únavy, čímž je ukončena trvanlivost vzorku. Dále je určen čas od počátku zkoušky, který je následně zaznamenán. Příklad průběhu experimentu a jeho vyhodnocení je znázorněno v řešeršní části na obr. 2-20.

4.5.2 Určení trvanlivosti materiálu

Pro určení základní trvanlivosti materiálu je nejprve nutné provést dvouparametrické Weibullovo rozdělení, do kterého vstupuje doba trvanlivosti jednotlivých vzorků. Toto rozdělení je následně vykresleno do grafu, ze kterého je vybrán 10% kvantil (doba, při které došlo k poruše u 10 % vzorků).

Dvouparametrické Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení se používá k vyhodnocení dat, bez ohledu na to, zda je intenzita poruch rostoucího, klesajícího či konstantního charakteru [35]. Weibullovo rozdělení nachází uplatnění v širokém rozsahu. U měřených objektů je nutno zaznamenávat dobu do poruchy nebo cykly do poruchy.

Dvouparametrické Weibullovo rozdělení je nejpoužívanější rozdělení pro analýzu dat o době života, přičemž hustota pravděpodobnosti je dána následující rovnicí:

$$f(t) = \beta \cdot \frac{t^{\beta-1}}{\eta^{\beta}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (4-1)$$

Kde: t – doba vyjádřená jako proměnná

η – charakteristická doba života (parametr měřítka)

β – parametr tvaru

V současné době existuje řada statistických softwarů, které umožňují vykreslení Weibullova rozdělení. Těmito softwary jsou například MS Excel či Minitab.

5 VÝSLEDKY

V následující kapitole jsou shrnuty výsledky, kterých bylo dosaženo v experimentální části této diplomové práce. Dále jsou zde uvedeny poznatky potřebné pro splnění cílů diplomové práce.

5.1 Predikce trvanlivosti

Pro teoretický předpoklad trvanlivosti byly použity vztahy vycházející z kapitol 2.2.4 a 2.3.3. Výsledné hodnoty základních trvanlivostí jsou popsány rovnicemi 5-1 až 5-3 a jsou shrnuty v tabulce 5-1.

$$L_{10h(stat)} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{4691,5 \text{ N}}{2616,6 \text{ N}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 1380 \text{ min}^{-1}} = 69,6 \text{ h} \quad (5-1)$$

$$L_{10h(zmena)} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{4691,5 \text{ N}}{2378,8 \text{ N}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 1380 \text{ min}^{-1}} = 92,7 \text{ h} \quad (5-2)$$

$$L_{10h(opak)} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{4691,5 \text{ N}}{2476,4 \text{ N}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 1380 \text{ min}^{-1}} = 82,1 \text{ h} \quad (5-3)$$

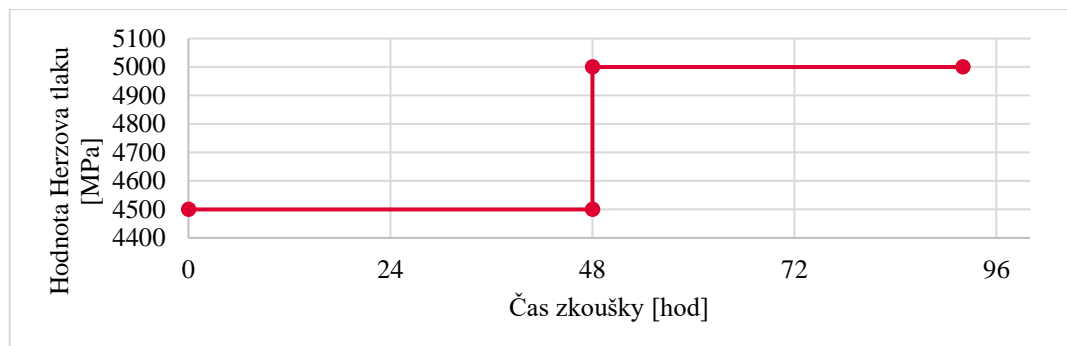
tab. 5-1 Predikovaná trvanlivost L_{10h} zkušebního vzorku

Druh zatížení	Predikovaná trvanlivost L_{10h}
Statické	69,6 h
Zatížení s jednou změnou	92,7 h
Opakovaná změna zatížení	82,1 h

5.2 Návrh metodiky experimentů s dynamickou změnou

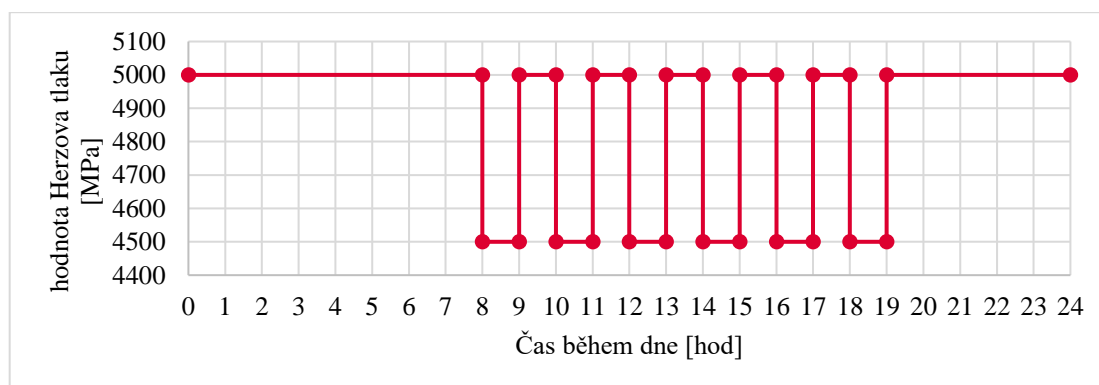
Jedním z úkolů této diplomové práce bylo navržení metodiky experimentů s dynamickou změnou. Tato metodika vychází z experimentů při statickém zatížení. Jelikož se jednalo o prvotní experimenty s dynamickou změnou v podobě změny zatížení, byla snaha zachovat standardně používané hodnoty kontaktního tlaku ve zkušebním vzorku jako při statických zkouškách. V tomto případě byly zvoleny hodnoty 5000 MPa a 4500 MPa Hertzova tlaku, přičemž mezi těmito hodnotami kontaktního tlaku byla vyvozována skoková změna díky změně zatížení.

V prvním experimentu s dynamickou změnou zatížení byla vyvolána jedna změna zatížení. Experiment byl navržen tak, že 48 hodin byl zkušební vzorek zatížen tím způsobem, že hodnota Hertzova tlaku dosahovala velikosti 4500 MPa. Následně bylo zatížení zvýšeno tak, aby hodnota kontaktního tlaku dosahovala 5000 MPa, přičemž toto zatížení trvalo až do konce zkoušky. Průběh tohoto experimentu je znázorněn na obr. 5-1.



obr. 5-1 Průběh zatížení s jednou skokovou změnou zatížení

Dalším z provedených experimentů bylo měření s dynamickou změnou zatížení v podobě opakovaných skokových změn. Tato dynamická změna se skládala z 24hodinových cyklů (obr. 5-2), které se stále opakovaly až do ukončení zkoušky. Během jednoho cyklu byla 12 hodin prováděna změna zatížení (každou hodinu), a zbylých 12 hodin bylo zatížení konstantní. To bylo způsobeno tím, že skokové změny bylo nutné provádět manuálně, a tedy v nočních hodinách bylo zatížení konstantní. Během opakované skokové změny opět zatížení kolísá tak, aby hodnoty kontaktního tlaku dosahovaly 4500 MPa a 5000 MPa.



obr. 5-2 Cyklus zatížení s opakovanou změnou zatížení

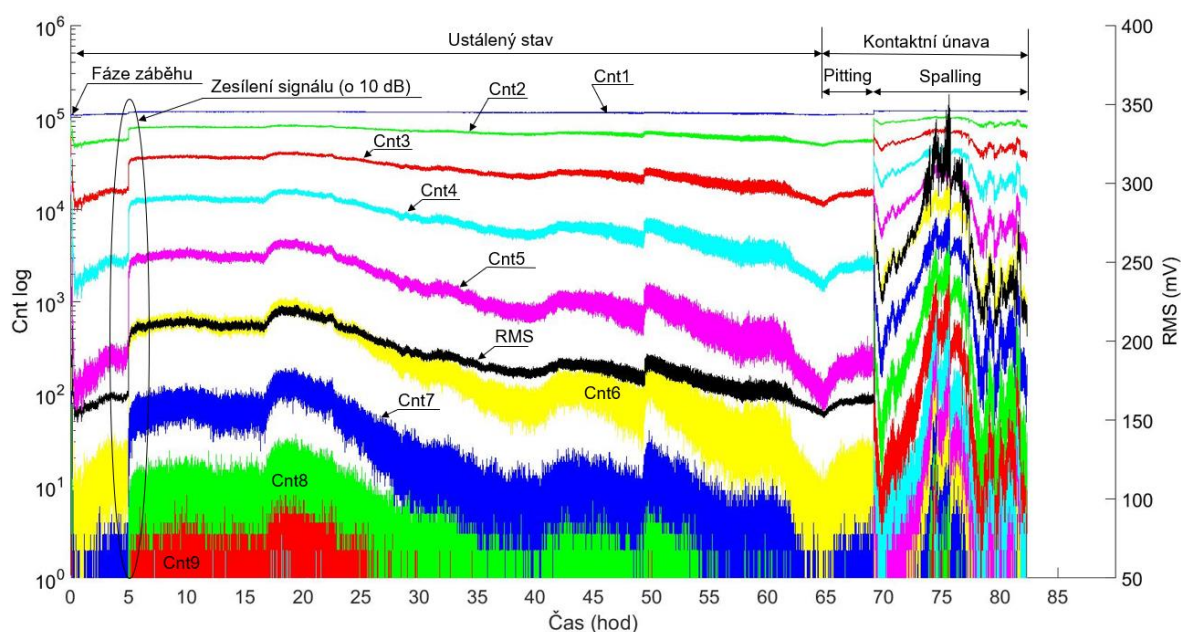
Všechny experimenty byly prováděny při konstantních otáčkách 1380 min^{-1} .

Výše zmíněné experimenty představují vstupní systém měření do této problematiky. Snahou bylo navrhnout tyto experimenty tak, aby se výrazným způsobem neprodloužila doba experimentů a zároveň bylo zachyceno, jaký vliv mají dynamické změny na trvanlivost vybraného materiálu. Byly tedy převzaty dvě nejvyšší hodnoty zatížení standardně používané při statickém zatěžování, mezi kterými byla provedena změna zatížení.

5.3 Zkoušky trvanlivosti ložiskového materiálu při statickém (konstantním) zatížení

V první řadě byla ověřena trvanlivost dvaceti zkušebních vzorků oceli 100Cr6 při statickém zatížení, kdy hodnota Hertzova tlaku dosahovala hodnoty 5000 MPa. Vzorky byly zatěžovány při konstantních otáčkách 1380 min^{-1} . Při zkoušce byla sledována intenzita vibrací a signál akustické emise. Hodnota hladiny vibrací pro ukončení experimentů byla nastavena na hodnotu $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tato hladina pro ukončení testu byla určena experimentálně, jelikož při nižších hodnotách nebylo vždy dosaženo kontaktní únavy.

Dále byla sledována odezva signálu AE na vznik kontaktní únavy. Díky tomu bylo potvrzeno, že metoda akustické emise je schopna detekovat kontaktní únavu dříve, než se tento druh poškození projeví nárůstem vibrací. Záznam signálu AE během zkoušky je znázorněn na obr. 5-3. Je zde zobrazeno devět hladin četnosti překmitů přes stanovený práh (Cnt1 až Cnt9) a efektivní hodnota signálu (RMS).



obr. 5-3 Průběh zkoušky trvanlivosti při statickém zatížení (vzorek – S1)

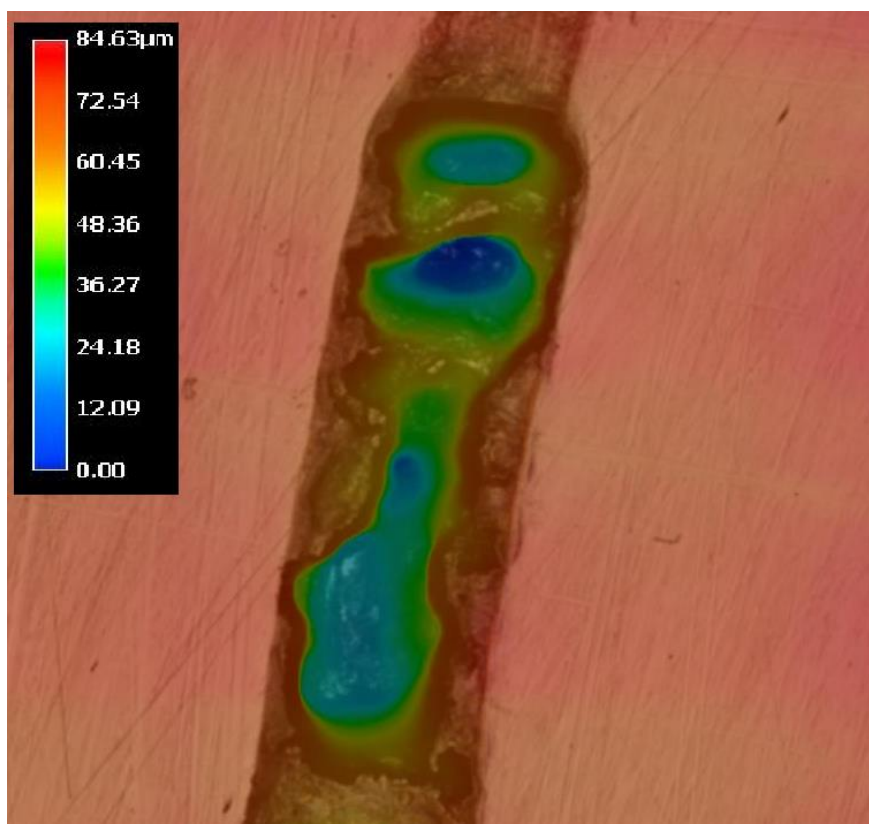
Dále je na obr. 5-3 možné pozorovat jednotlivá stadia poškození vzorku. Zpočátku je zde zachycena fáze záběhu, při které dochází k vytvoření oběžné dráhy na zkušebním vzorku, která vzniká plastickou deformací. Tato fáze trvá řádově několik minut (maximálně do jedné hodiny). Následuje klidová fáze v podobě ustáleného stavu. V této fázi se pohybovala intenzita vibrací mezi 1 až $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Během ustáleného stavu dochází nejprve k nárůstu signálu, ovšem ten poté (po 20. hodině) začne klesat. To je způsobeno postupným vyhlazováním vyjeté dráhy, ale také zpevňováním materiálu v tomto místě. Po 65. hodině experimentu dochází k opětovnému nárůstu signálu. To je již způsobeno vznikajícím pittingem, který před 70. hodinou přechází ve spalling. Současně v tuto dobu, kdy dochází

k rapidnímu nárůstu všech hladin četnosti překmitů, a především efektivní hodnoty signálu (RMS), začíná také narůstat intenzita vibrací. Jelikož se u dalších měření záznam AE znatelně neliší, stačí pro názornou ukázkou pouze tento zástupce.

Zkušební vzorek byl následně vyjmut z držáku a očištěn od plastického maziva, aby mohl být povrch, a především stopa oběhu kuliček dále zkoumána. Výrazné defekty v podobě spallingu je možné vidět na obr. 5-4 v červeně vyznačené oblasti. Jiné významné defekty objeveny nebyly.

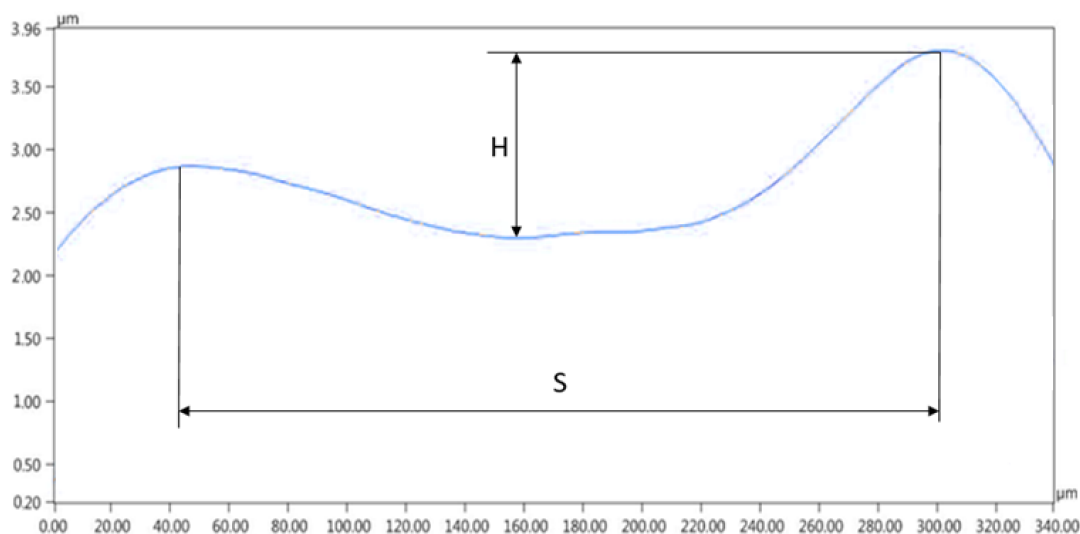


obr. 5-4 Povrch zkušebního vzorku S1 po zkoušce



obr. 5-5 3D mapa defektu na vzorku S1 (zvětšeno 250x)

Dále byla určena šířka oběžné dráhy a její průřez pomocí optického mikroskopu. Šířka oběžné dráhy byla 260 μm (S) a její hloubka byla 1,5 μm (H) viz obrázek 5-6.



obr. 5-6 Příčný řez oběžnou drahou

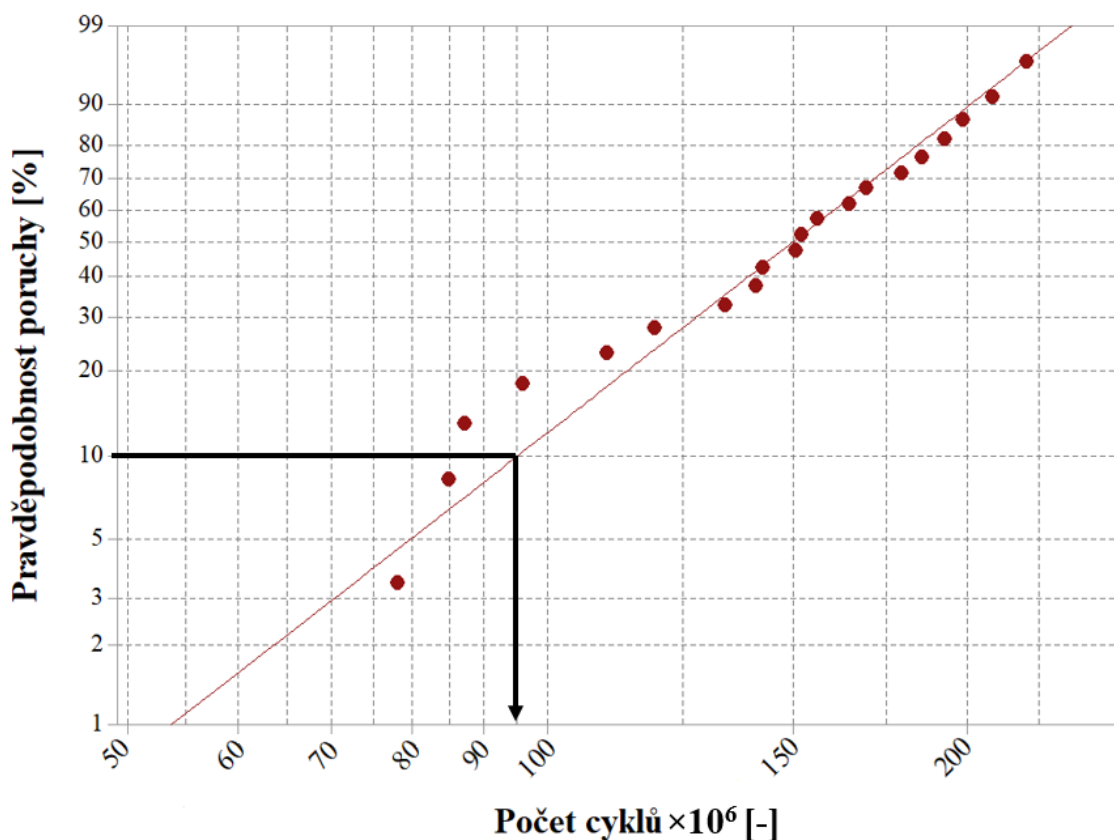
5.3.1 Určení základní trvanlivosti

Jak již bylo řečeno, určení základní trvanlivosti proběhlo na sérii dvaceti zkušebních vzorků. Získané hodnoty trvanlivosti v počtech cyklů jsou zobrazeny v tabulce 5-2.

tab. 5-2 Měření trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při statickém zatížení

Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]	Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]
S1	78046	S11	152047
S2	84828	S12	156046
S3	87093	S13	164437
S4	95921	S14	169328
S5	110328	S15	179234
S6	119267	S16	185531
S7	133969	S17	192625
S8	141000	S18	198375
S9	142609	S19	208546
S10	150500	S20	220343

Dále bylo také nutné provést dvouparametrické Weibullovo rozdělení, které bylo následně vykresleno do grafu. Grafické znázornění umožňuje lepší orientaci a také snadnější určení základní trvanlivosti materiálu L_{10} . Byl tedy vybrán 10% kvantil, který udává hodnotu hledané základní trvanlivosti L_{10} . Vše je znázorněno na následujícím obrázku 5-7.



obr. 5-7 Weibullovo rozdělení trvanlivostí oceli 100Cr6 při statickém zatížení

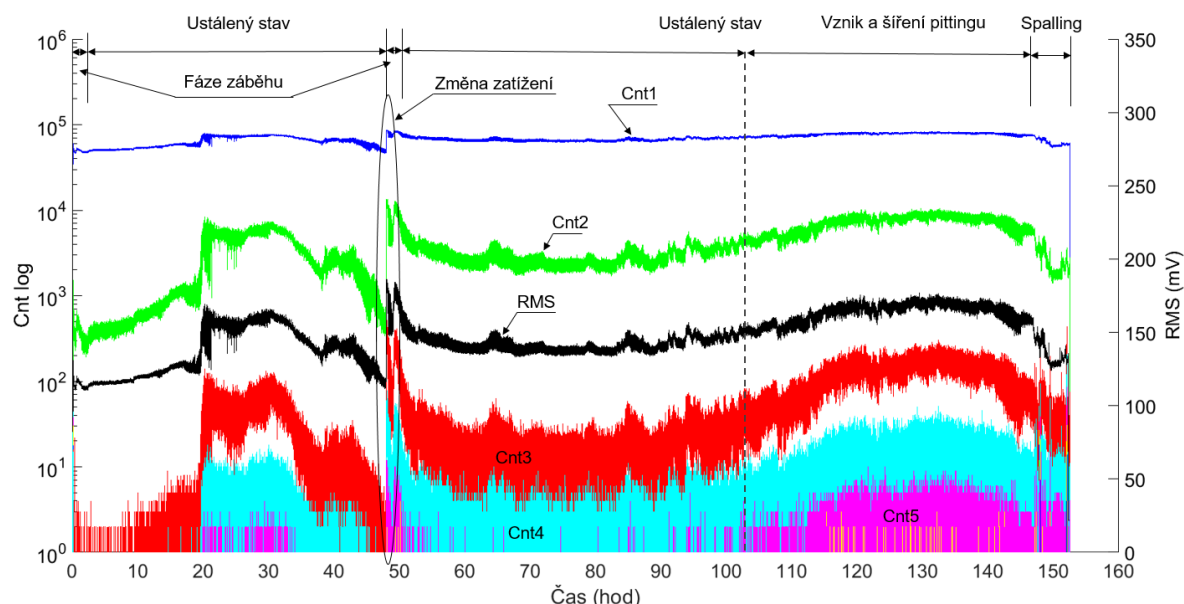
Základní trvanlivost L_{10} při statickém zatížení dosahuje hodnoty $95005 \cdot 10^3$ cyklů, což odpovídá trvanlivosti L_{10h} , jejíž hodnota je **101,2 hodin**.

5.4 Trvanlivost ložiskového materiálu při dynamickém zatížení – jedna skoková změna

Pro tento trend zatížení bylo opět provedeno měření na dvaceti zkušebních vzorcích. Snímána byla intenzita vibrací a signál AE. Hladina vibrací pro ukončení experimentu byla opět hodnota 10 m/s^{-2} .

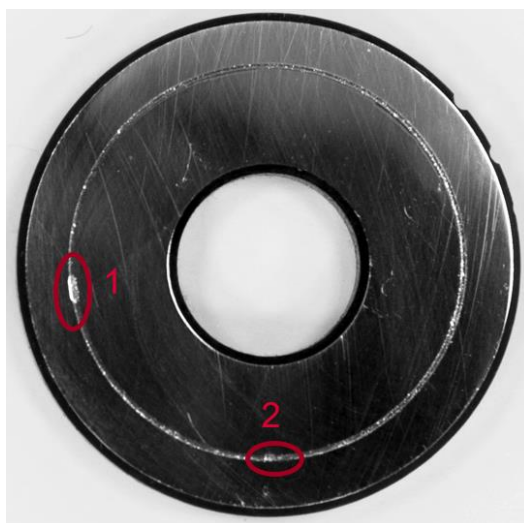
Na obrázku 5-8 je možné vidět průběh signálu akustické emise zkoušky vzorku J4, který byl vybrán jako zástupce za tuto sérii experimentů. Je zde vyobrazeno pět hladin četnosti překmitů z celkových šestnácti a efektivní hodnota signálu (RMS). Opět je zpočátku zachycena fáze záběhu, po které následuje fáze ustáleného stavu. Jelikož bylo po 48. hodině

experimentu zvýšeno zatížení na hodnotu 5000 MPa Hertzova tlaku, následuje opět fáze záběhu pro toto zvýšené zatížení. Poté následuje ustálený stav. Okolo 103. hodiny zkoušky je detekován růst hodnoty RMS a Cnt2 až Cnt5, přičemž právě hladina Cnt5 začíná růst výrazným způsobem. Tento nárůst je způsoben pravděpodobným vznikem pittingu, který se ovšem neprojevuje nárůstem vibrací, tudíž zkouška dále pokračuje. Od 145. hodiny dochází ke skokovým změnám signálu, což značí počáteční výskyt spallingu, který vede k nárůstu vibrací a ukončení testu.

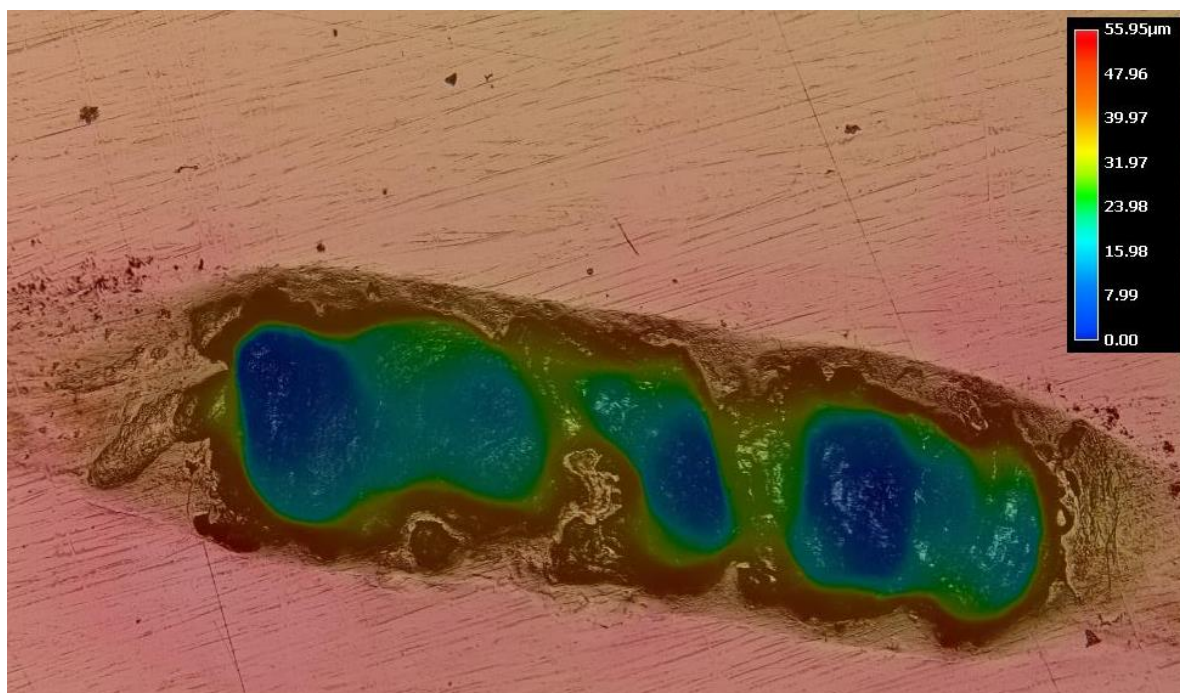


obr. 5-8 Průběh signálu AE vzorku J4 s jednou skokovou změnou

Pro ukázkou kontaktní únavy je použit také vzorek J4, který je zobrazen na obrázku 5-8. Na tomto vzorku vznikly dvě oblasti s kontaktní únavou v podobě spallingu. Tyto defekty jsou vyznačeny na tomtéž obrázku 5-8 a označeny číslicemi 1 a 2. Detail vzniklého spallingu na tomtéž vzorku je dále vyobrazen na následujícím obrázku 5-9.



obr. 5-9 Vzorek J4 po zkoušce trvanlivosti



obr. 5-10 3D mapa defektu 1 na vzorku J4 (zvětšeno 250x)

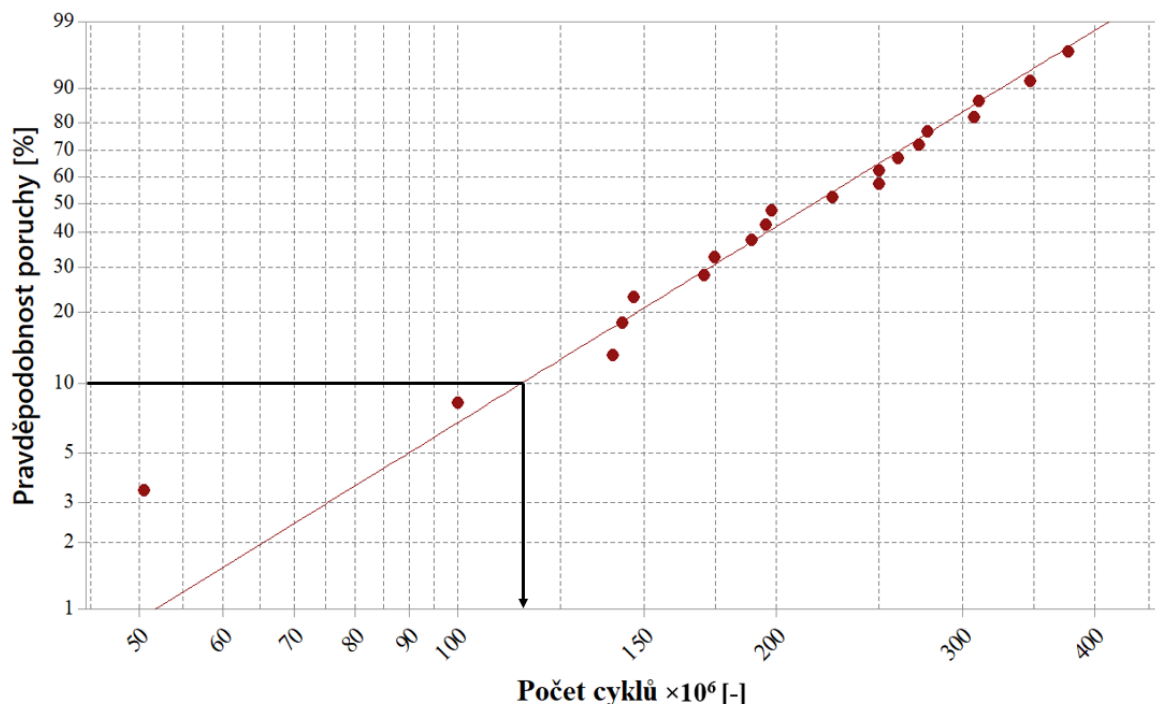
5.4.1 Určení základní trvanlivosti

Trvanlivost byla opět měřena na 20 zkušebních vzorcích ložiskové oceli 100Cr6. Jednotlivé hodnoty experimentů jsou shrnuty v tabulce 5-3.

tab. 5-3 Získané trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při jedné změně zatížení

Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]	Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]
J1	50546	J11	250171
J2	100015	J12	261000
J3	140171	J13	272906
J4	142984	J14	277968
J5	146703	J15	195656
J6	170937	J16	307796
J7	174921	J17	311140
J8	189640	J18	347343
J9	198203	J19	377890
J10	225906	J20	250171

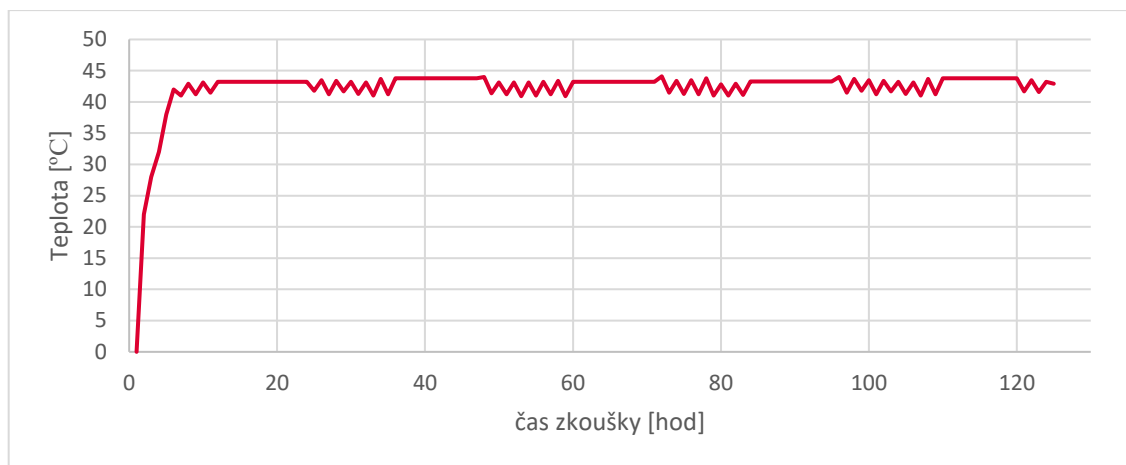
Na obrázku 5-11 je možné vidět dvouparametrické Weibullovo rozdělení pro zatížení s jednou skokovou změnou. Z tohoto grafu je dále určen 10% kvantil, který odpovídá základní trvanlivosti L_{10} . Tato hodnota je rovna $111213 \cdot 10^3$ cyklům (118,6 hodin).



obr. 5-11 Weibullovo rozdělení trvanlivostí materiálových vzorků při jedné změně zatížení

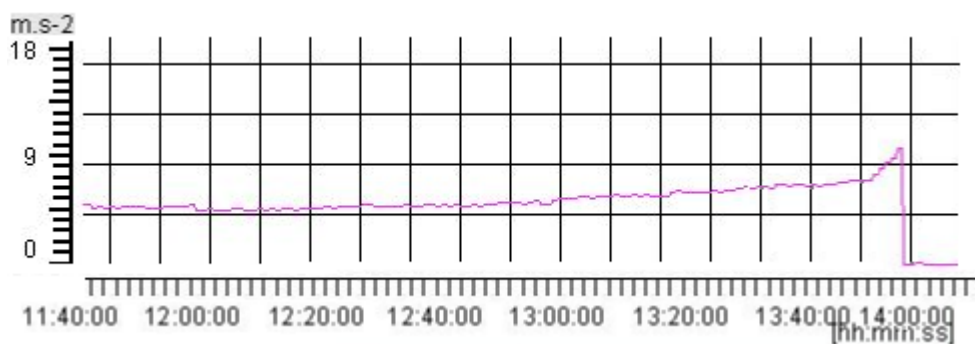
5.5 Trvanlivost ložiskového materiálu při dynamickém zatížení – opakovaná skoková změna

Na závěr byla provedena série experimentů s dynamickou změnou zatížení v podobě skokových změn. Jako u předchozích experimentů byla sledována intenzita vibrací, signál akustické emise, ale také teplota, která byla měřena bezkontaktním teploměrem každou hodinu před změnou zatížení. Během těchto experimentů bylo zjištěno, že vibrace nejsou schopny zachytit změnu zatížení a jejich hodnota se pohybovala v rozmezí $2,4 \pm 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Co se týče teploty, tak ta se díky změně zatížení také měnila. Při zatížení vzorku, kdy hodnota Hertzova tlaku byla 4500 MPa se teplota ustálila okolo 41 °C. Při větším zatížení (5000 MPa Hertzova tlaku) se teplota ustálila přibližně na 43 °C. To znamená, že teplota je schopna zachytit změnu zatížení, ovšem co se týče vzniku kontaktní únavy, tak snímání teploty dostačující není.



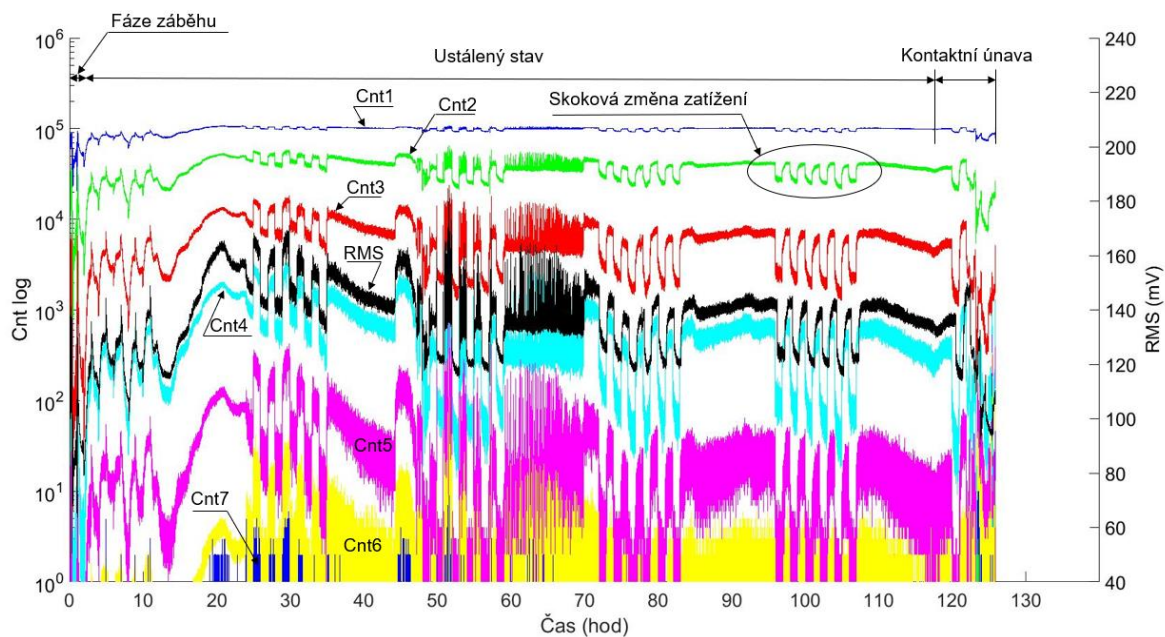
obr. 5-12 Průběh teploty během experimentu vzorku D3

Od 123. hodiny (odpovídá 12:00 reálného času na obr. 5-13) experimentu začaly také postupně narůstat i vibrace. Intenzita vibrací během dalších dvou hodin dosáhla $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, tedy hladiny vibrací pro ukončení experimentu.



obr. 5-13 Nárůst vibrací na konci experimentu vzorku D3

Na obrázku 5-14 je zobrazen záznam signálu AE ze zkoušky D3 ložiskové oceli 100Cr6, který byl vybrán jako zástupce pro tento experiment. Při této zkoušce byla aplikována dynamická změna zatížení, která je díky tomuto záznamu zachycena.



obr. 5-14 Úplný záznam akustické emise ze zkoušky trvanlivosti vzorku D3

Ze záznamu akustické emise je možné vidět obdobné fáze jako u předchozích experimentů. Po počáteční fázi záběhu následoval ustálený stav. Ze signálu AE je možné vidět, že okolo 20. až 30. hodiny dochází k dosažení maxima signálu, a to na všech hladinách. Dále od 47. hodiny do 70. hodiny experimentu je možné pozorovat výraznější změny akustického signálu na všech hladinách. Tímto je zaznamenán vznik pittingu, který nevedl k ukončení experimentu, ale postupně došlo k zaválcování tohoto defektu oběžné dráhy a experiment tedy pokračoval dále. Od 118. hodiny dochází opět k nárůstu signálu, který je zachycen na 2. až 6. hladině četnosti překmitů (Cnt2-Cnt6), a také efektivní hodnotou signálu (RMS). To značí počátek vzniku povrchového defektu v podobě pittingu, který od 123. přechází ve vznik spallingu. Spalling se také začíná projevovat na vibracích.

Výhodou akustické emise je tedy schopnost zachycení změny zatížení. Na druhou stranu, nevýhodou je, že během vzniku kontaktní únavy dochází ke změně zatížení a nejde jednoznačně určit, kdy přesně došlo ke spallingu.

Na obrázku 5-15 je zobrazeno výsledné poškození vzorků D3 a D18. Lze vidět, že se během experimentů měnila také velikost defektu.



obr. 5-15 Povrch vzorků D3 – (a) a D18 – (b) po zkoušce

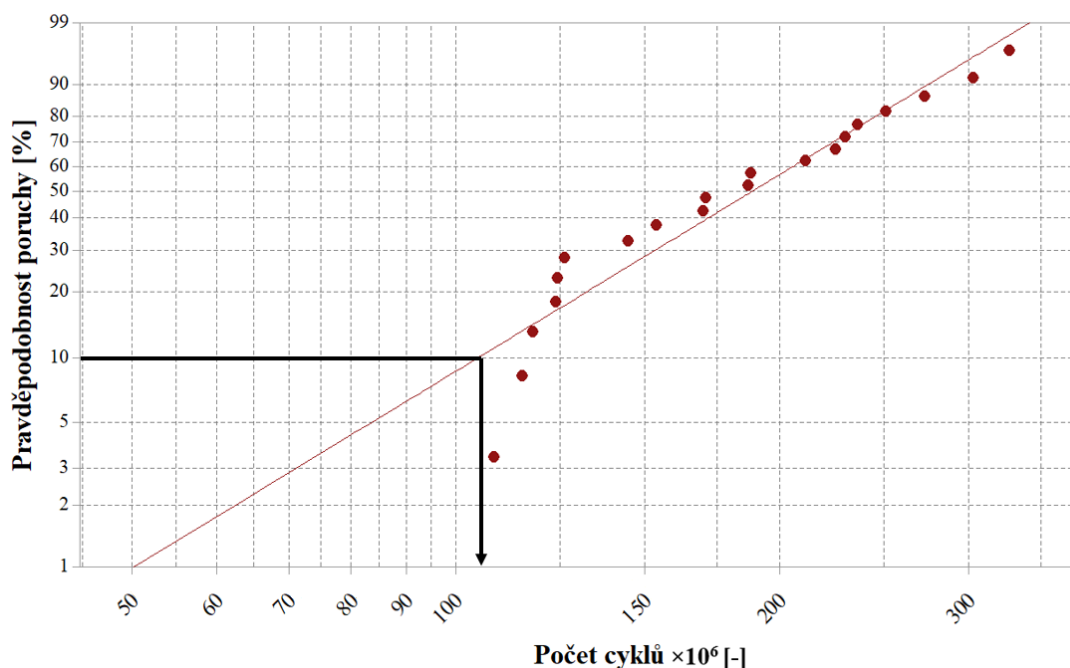
5.5.1 Určení základní trvanlivosti

Určení základní trvanlivosti materiálu, který byl podroben dynamickému zatěžování, proběhlo standardním způsobem jako u předchozích experimentů. Určení trvanlivosti proběhlo tedy opět na základě provedení 20 experimentů. Jednotlivé hodnoty trvanlivosti experimentů jsou uvedeny v počtech cyklů v tabulce 5-4.

tab. 5-4 Získané trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při dynamické změně zatížení (opakovaná změna)

Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]	Vzorek	Počet cyklů $\times 10^3$ [-]
D1	108609	D11	187093
D2	115359	D12	188250
D3	118031	D13	211671
D4	123921	D14	225671
D5	124484	D15	230593
D6	126359	D16	236656
D7	144656	D17	251531
D8	153921	D18	272984
D9	169906	D19	303046
D10	170953	D20	327203

Rozložení trvanlivosti bylo provedeno opět pomocí dvouparametrického Weibullova rozdělení. Při opakované dynamické změně zatížení odpovídala trvanlivost L_{10} hodnotě $111473 \cdot 10^3$ cyklů, což se rovná trvanlivosti L_{10h} , jejíž hodnota je **111 hodin**.

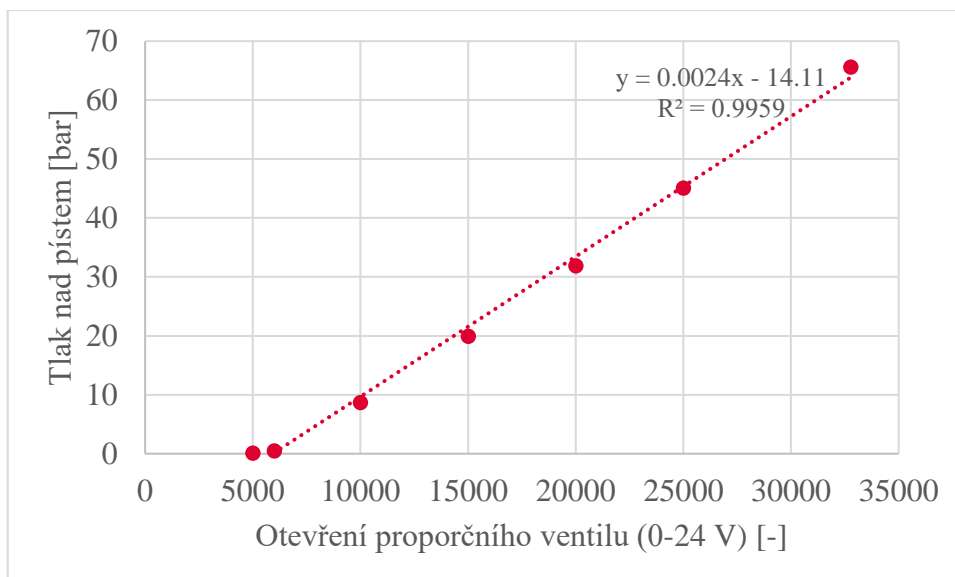


obr. 5-16 Weibullovo rozdělení trvanlivosti vzorků s opakovanou dynamickou změnou

5.5.2 Zprovoznění hydraulické varianty zařízení AXMAT

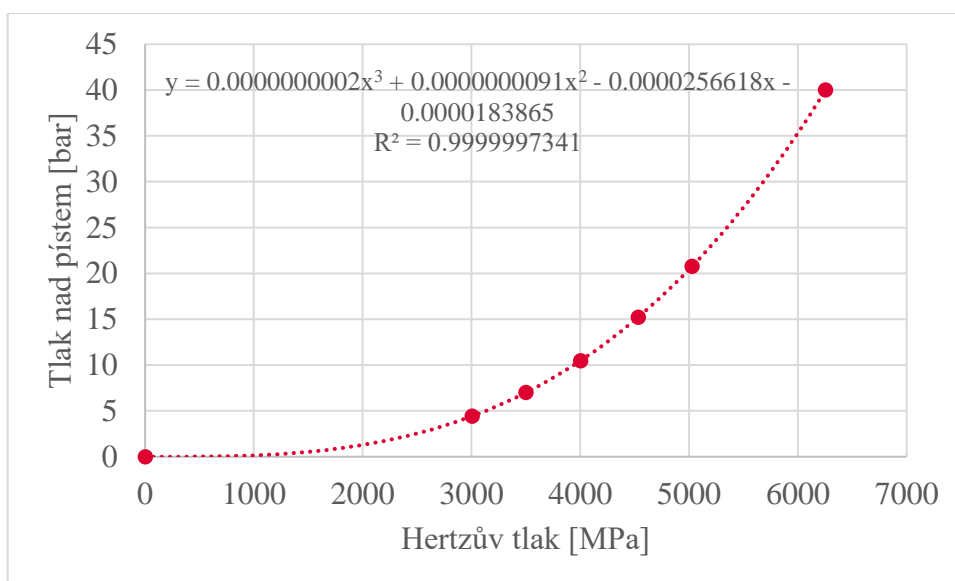
Úkolem této diplomové práce bylo také zprovoznění hydraulické varianty stanice AXMAT. Tato stanice AXMAT je experimentální stanice, kde je zatěžovací síla vyvozována pomocí hydraulického válce. Stanice byla navržena a vyrobena v rámci dizertační práce [24]. Nebyla ovšem podrobena dlouhodobým testům a chyběla její elektronická část, tudíž bylo nutné provést její ověření. Během rekonstrukce na začátku tohoto roku byla dokoupena chybějící elektronika a bylo vyřešeno ovládání pomocí technického počítače. To ovšem nebylo předmětem řešení této diplomové práce. Cílem této diplomové práce bylo pouze ověření funkčnosti této zkušební stanice.

Nejprve však bylo nutné zjistit, jaké hodnoty je potřeba nastavit pro otevření proporčního ventilu, aby mohlo být vyvozeno požadované zatížení. Otvírání tohoto ventilu má lineární charakter, který se začne projevovat až po překročení hodnoty 6000. Samotný průběh je zobrazen na obrázku 5-17. Na horizontální ose jsou vyneseny hodnoty potřebné pro rozdělení napájení proporčního ventilu a na vertikální ose jsou vyneseny hodnoty odpovídající tlakům v hydraulickém systému.



obr. 5-17 Závislost otevření proporčního ventilu a tlaku v hydraulickém válci

Následně byl proveden také přepočet z tlaku v hydraulickém systému na požadovaný Hertzův tlak ve zkušební vzorku. Tato závislost je vyobrazena na obrázku 5-18.



obr. 5-18 Závislost mezi tlakem v hydraulickém válci a Hertzovým tlakem

Na základě experimentu s opakovanou změnou zatížení proběhlo tedy otestování funkčnosti této zkušební stanice. Po několika hodinách provozu došlo k enormnímu nárůstu hydraulického oleje v systému. Teplota oleje se ustálila na teplotě 137 °C a po dvanácti hodinách provozu bylo nutné zařízení vypnout, jelikož by mohlo dojít k oxidaci oleje, ale také hydraulické hadice nejsou stavěny na tak vysokou teplotu. Tento nárůst teploty byl způsoben neustálým provozem hydraulického čerpadla, které vyvozuje tlak v obvodu.

Problém přehřívání oleje je způsoben špatně navrženým hydraulickým obvodem. Stačilo by jen oddělit primární a sekundární okruh tak, aby bylo možné sekundární okruh uzavřít z důvodu udržení potřebného tlaku. Poté by v případě poklesu či změny tlaku proběhlo otevření tohoto okruhu a spuštěním čerpadla by byl vyvinut v sekundárním obvodu potřebný tlak. Řešením je tedy koupě nového hydraulického rozvaděče, který by okruh rozdělil na dva.

6 DISKUZE

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení experimentů s dynamickou změnou v podobě skokové změny zatížení, které byly následně vyhodnoceny. Tato dynamická změna byla aplikována na zkušební vzorky vybrané ložiskové oceli, kterou byla zvolena prokalitelná ocel 100Cr6.

Souběžně s touto diplomovou prací probíhala rekonstrukce laboratoře kontaktní únavy na ÚK, a především zkušebních stanic AXMAT. Z důvodu urychlení bylo v rámci této práce navrženo a vyrobeno oplechování původní rozvaděčové skříně, tak aby vyhovovala nové elektronice. Výkresová dokumentace vyrobených dílů je přiložena v příloze.

Dále bylo nutné zjistit na základě provedených experimentů, jaký vliv má trend zatěžování na vznik kontaktní únavy. Byly tedy provedeny tři kompletní série experimentů (statické zatížení, jedna změna zatížení a opakovaná změna zatížení). Každá série obsahovala 20 zkušebních vzorků, přičemž výsledná trvanlivost těchto vzorků byla stanovena na základě zrychlení vibrací. Z těchto provedených experimentů byla dále stanovena základní trvanlivost L_{10} materiálu pro daný průběh zatížení vybráním 10% kvantilu z grafů Weibullova rozdělení. Tato základní trvanlivost byla dále přepočítána na základní trvanlivost L_{10h} . Výsledné hodnoty základních trvanlivostí L_{10h} jsou zobrazeny v tabulkách 6-1 a 6-2. V těchto tabulkách je dále určena odchylka Δ mezi statickým a proměnlivým zatěžováním teoretických i experimentálních hodnot. Výpočet odchylky Δ je proveden podle následujícího vztahu:

$$\Delta = \frac{|L_{10h}(\text{staticky}) - L_{10h}(\text{změna})|}{L_{10h}(\text{staticky})} \cdot 100 [\%] \quad (6-1)$$

Na základě těchto experimentů bylo zjištěno, že pořadí predikovaných a skutečných trvanlivostí zůstává stejné i přes to, že ocel 100Cr6 není ideální pro dynamické změny v zatížení, z důvodu tvrdšího jádra, které hůře absorbuje změny zatížení.

tab. 6-1 Odchylka teoretických základních trvanlivostí vůči statickému zatížení

	Teoretický předpoklad základní trvanlivosti [h]	Odchylka Δ teoretických hodnot [%]
Statické zatížení	69,6	0,0
Zatížení s jednou změnou	92,7	33,2
Zatížení s opakovanou změnou	82,1	18,0

tab. 6-2 Odchylka experimentálních základních trvanlivostí vůči statickému zatížení

	Experimentálně získaná hodnota základní trvanlivosti [h]	Odchylka Δ experimentálních hodnot [%]
Statické zatížení	101,2	0,0
Zatížení s jednou změnou	118,6	17,2
Zatížení s opakovanou změnou	111,0	9,7

Z hlediska přesnosti předpokladu dopadly experimentální hodnoty základní trvanlivosti výrazně lépe, jelikož základní trvanlivost narostla ve všech případech. Tato nepřesnost je způsobena tím, že je použit základní vzorec pro teoretický předpoklad trvanlivosti, do kterého nevstupují proměnné ovlivňující trvanlivost materiálu. Nejhuře dopadl předpoklad při statickém zatížení, kdy se hodnoty liší o 45,4 %. Srovnání jednotlivých experimentů a jejich odchylky jsou shrnuty v tabulce 6-3.

$$\Delta = \frac{|L_{10h}(teorie) - L_{10h}(experiment)|}{L_{10h}(teorie)} \cdot 100 [\%] \quad (6-2)$$

tab. 6-3 Relativní odchylka experimentálně získaných trvanlivostí od teoretického předpokladu

Teoretický předpoklad trvanlivosti [h]	Experimentálně získaná hodnota trvanlivosti [h]	Vzájemná Odchylka [%]
69,6	101,2	45,4
92,7	118,6	27,9
82,1	111,0	35,2

Bylo tedy zjištěno, že při statickém zatížení dosahují zkušební vzorky nejkratší základní trvanlivosti. Naopak největší základní trvanlivosti dosáhly vzorky s jednou skokovou změnou v zatížení.

Provedené experimenty byly také sledovány pomocí metody akustické emise, která sloužila k zachycení průběhu experimentů a změny zatížení. Bylo potvrzeno, že metoda AE je schopna zachytit poškození kontaktní únavy dříve než vibrodiagnostika.

Jelikož nebylo možné využít hydraulickou variantu zkušebního zařízení, veškeré experimenty byly provedeny na současných zařízeních, kde je zatížení zkušebního uzlu vyvoláno pomocí páky. Aby bylo možné změnu vyvolat snáze a nemuselo se měnit rameno páky, proběhl přepočít tabulkových hodnot zatížení na potřebné hodnoty. Změna zatížení byla tedy vyvolána manuální změnou závaží na konstantním rameni. Toto řešení je ovšem velice nepohodlné a pro budoucí testy při dynamickém zatěžování bude nutné odstranit konstrukční chyby v hydraulickém řešení.

Dále také díky provedeným experimentům proběhlo, otestování inovovaného diagnostického systému zařízení AXMAT. Je nutno říci, že nyní je snímání vibrací velice přesné a spolehlivé. Do budoucna bude třeba ještě software doplnit o ukládání průběhu vibrací, jelikož v současné době je možné sledovat jen jejich průběh v reálném čase.

7 ZÁVĚR

Veškeré cíle této diplomové práce byly splněny. Předkládaná práce se zabývala vlivem dynamického zatěžování na kontaktní únavové charakteristiky ložiskové oceli 100Cr6.

V první části diplomové práce byla provedena rešerše týkající se problematiky ložisek a především kontaktní únavy. Na to bylo navázáno metodou akustické emise a jejím využitím pro modelové zkoušky ložiskových materiálů a částí ložisek. Na závěr rešeršní části byly popsány další možnosti diagnostiky ložisek. Práce také kromě úvodu do problematiky popisuje použitou měřicí a experimentální aparatura včetně veškerých použitých snímačů. Byl zde také popsán zkušební materiál a geometrie zkušebních vzorků.

Dále byla navržena sada experimentů s dynamickou změnou, která byla následně aplikována na provedená měření. V experimentální části byly tedy provedeny tři kompletní série experimentů, pro které byla naměřena trvanlivost. Jedna série byla měřena při statickém zatížení a zároveň sloužila jako referenční. Další dvě série byly provedeny s dynamickou změnou zatížení v podobě skokové změny. Na základě těchto experimentů bylo zjištěno, jak se mění trvanlivost zkoušené ložiskové oceli 100Cr6.

Získané výsledky potvrdily predikci, což znamená, že při navrženém trendu dynamického zatěžování vzroste hodnota základní trvanlivost ložiskové oceli 100Cr6. Tento trend byl potvrzen i přes to, že tato ocel není ideální pro dynamické zatěžování v podobě skokových změn, jelikož jádro materiálu je tvrdší než povrch a tedy hůře absorbuje tyto skokové změny zatížení.

Tato diplomová práce tedy představuje vstupní část do měření trvanlivosti ložiskových materiálů s dynamickou změnou zatížení, které doposud byly prováděny jen při konstantním statickém zatížení. Přínosem této diplomové práce je rozšíření problematiky testování ložiskových materiálů při modelových zkouškách, jelikož doposud nebyla naměřena kompletní série materiálových vzorků s dynamickou změnou zatížení.

Na základě experimentů bylo také provedeno otestování hydraulické zkušební stanice AXMAT, díky čemuž bylo zjištěno, že v současné době není tato stanice vhodná na dlouhodobé testy ložiskových materiálů, z důvodu velkého nárůstu teploty oleje.

Jako námět dalšího výzkumu je možné provedení experimentů s dynamickou změnou pro jiné druhy ložiskových ocelí nebo provedení experimentů se zvětšenou skokovou změnou při dynamickém zatěžování.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SKF GROUP a S K F GROUP. Rolling bearings. *Skf bearings* [online]. 2012, 97–114. Dostupné z: <http://www.skf.com/binary/77-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf>
- [2] ZKL. Valivá ložiska. 2009.
- [3] BOHÁČEK, F. *Části a mechanismy strojů II, Hřídele, tribologie, ložiska*. 3. Brno.: PC-DIR spol. s.r.o - Nakladatelství, 1996. ISBN 80-214-0829-4.
- [4] SHIGLEY, J E, C R MISCHKE a R G BUDYNAS. *Shigle's Mechanical Engineering Design - 9th Ed.* [online]. 2002. ISBN 9780070568990. Dostupné z: doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2
- [5] HARRIS, T. A. a M. N. KOTZALAS. *Essential concept of bearing technology*. 2006. ISBN 13:978-0-8493-7183-7.
- [6] MAGEL, Eric. Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review. *ECS Transaction* [online]. 2010, **28**(32), 35–44. Dostupné z: doi:10.1039/B910216G
- [7] SADEGHI, Farshid, Behrooz JALALAHMADI, Trevor S. SLACK, Nihar RAJE a Nagaraj K. ARAKERE. A Review of Rolling Contact Fatigue. *Journal of Tribology* [online]. 2009, **131**(4), 041403. ISSN 07424787. Dostupné z: doi:10.1115/1.3209132
- [8] HALME, J. a P. ANDERSSON. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics - State of the art. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2010, **224**(4), 377–393. ISSN 13506501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET656
- [9] JACOBS, William, Brecht VAN HOOREWEDER, Rene BOONEN, Paul SAS a David MOENS. The influence of external dynamic loads on the lifetime of rolling element bearings: Experimental analysis of the lubricant film and surface wear. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2016, **74**, 144–164. ISSN 10961216. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2015.04.033
- [10] LETURIONDO, Urko, Oscar SALGADO, Diego GALAR a Madhav MISHRA. Methodology for the estimation of the fatigue life of rolling element bearings in non-stationary conditions Methodology for the Estimation of the Fatigue Life of Rolling Element Bearings in Non-stationary Conditions [online]. 2014, (December). Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-20463-5
- [11] JOMBO, Gbanaibolou a David MBA. A Fatigue Life Assessment Methodology for Rolling-Element Bearing Under Irregular Loading A Fatigue Life Assessment Methodology for Rolling-Element Bearing Under Irregular Loading. 2015, (June).
- [12] AIT SGHIR, Khalid, Fabrice BOLAERS, Olivier COUSINARD a Jean-Paul DRON. Vibratory monitoring of a spalling bearing defect in variable speed regime. *Mechanics & Industry* [online]. 2013, **14**(2), 129–136. ISSN 2257-7777. Dostupné z: doi:10.1051/meca/2013060
- [13] MICHALCZEWSKI, Remigiusz, Witold PIEKOSZEWSKI, Marian SZCZEREK a Jan WULCZYŃSKI. A method for the assessment of the rolling contact fatigue of modern engineering materials in lubricated contact. *Transactions of Famena*. 2012, **36**(4), 39–48. ISSN 13331124.

- [14] NOHÁL, L. *Korelace změny signálu AE s rozvojem kontaktního poškození*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] GHOLIZADEH, S., Z. LEMAN a B.T.H.T. BAHARUDIN. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Structural Engineering and Mechanics* [online]. 2015, **54**(6), 1075–1095. ISSN 1225-4568. Dostupné z: doi:10.12989/sem.2015.54.6.1075
- [16] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. B.m., 2011. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství.
- [17] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [18] ČSN EN, 13554. Nedestruktivní zkoušení – Akustická emise – Všeobecné zásady. 2011. Praha.
- [19] SKF GROUP. *Monitoring the wind of change* [online]. 2006. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/us/monitoring-the-winds-of-change/>
- [20] COUTURIER, J a D MBA. Operational Bearing Parameters and Acoustic Emission Generation [online]. 2008, **130**, 1–5. Dostupné z: doi:10.1115/1.2776339
- [21] ELFORJANI, M. a D. MBA. Natural mechanical degradation measurements in slow speed bearings. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2009, **16**(1), 521–532. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2008.06.005
- [22] WARREN, A W a Y B GUO. International Journal of Fatigue Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces [online]. 2007, **29**, 603–614. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.07.010
- [23] NOHÁL, L., F. HORT, J. DVOŘÁČEK a P. MAZAL. An experimental investigation of rolling contact fatigue of steels using acoustic emission method. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* [online]. 2013, **55**(12), 665–669. ISSN 13542575. Dostupné z: doi:10.1784/insi.2012.55.12.665
- [24] DVOŘÁČEK, Jiří. *Vývoj nové generace zařízení s pokročilou diagnostikou pro stanovení kontaktní degradace*. B.m., 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [25] BLATA, Jan. *Metody technické diagnostiky* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 9788024827353. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2735-3.pdf>
- [26] FREJLICH, Jan. *Konstrukce experimentálního zařízení pro trvanlivostní zkoušky ložisek*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Svoboda, Ph. D., 2015.
- [27] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika*. 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [28] CHLADA, Milan, Libor NOHÁL a Zdenek PREVOROVSKY. Condition monitoring of thrust ball bearings using continuous AE. In: *32nd European Conference on Acoustic Emission Testing*. 2016, s. 125–136.
- [29] PARAMO, A.s. *Technické informace k mazivu* [online]. Dostupné z: <https://eshop.paramo.cz/zbozi.aspx?kod=V591315320>

- [30] ČSN EN, 14 4109. Chromovaná ocel pro valivá ložiska: ocel 14 109. 1978. Praha.
- [31] HROŠ, Michal. *Hodnocení mikrostrukturních parametrů ložiskových ocelí s ohledem na jejich mechanické vlastnosti a žívnostnost*. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [32] STŘEDISKO TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY - DAKEL. *Akustická emise* [online]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=about>.
- [33] DAKEL. *Uživatelská příručka k programu Deamon*. Praha: Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech, Středisko technické diagnostiky DAKEL, 2011.
- [34] STUPKA, K. *Hodnocení ložiskové oceli na odolnost vůči kontaktní únavě*. Brno., 1989. Vysoké učení technické v Brně.
- [35] ČSN EN, 61 649. Weibullova analýza. Praha.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
AE	Akustická emise
AXMAT	Zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky (axiální ložiska)
C	Uhlík
Cnt	Count
Cr	Chrom
Cu	Měď
FSI	Fakulta strojního inženýrství
HB	Tvrдость dle Brinella
HRC	Tvrдость dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
Mn	Mangan
Ni	Nikl
P	Fosfor
S	Síla
Si	Křemík
TAČR	Tehnologická agentura České republiky
ÚK	Ústav konstruování
VUT	Vysoké učení technické
ZKL	Závody kuličkových ložisek

Symbol	Jednotka	Veličina
a_1	[-]	Koeficient spolehlivosti
a_{23}	[-]	Koeficient materiálu, maziva, technologie výroby a provozních podmínek
C	[kN]	Základní dynamická únosnost
C_a	[kN]	Dynamická únosnost radiálního směru
C_r	[kN]	Dynamická únosnost radiálního směru
F_{eq}	[N]	Výsledná hodnota zatěžující síly
g	[m/s ⁻²]	Gravitační zrychlení
L_{10}	[10 ⁶ ot]	Základní trvanlivost při spolehlivosti 90 %
L_{10h}	[h]	Základní trvanlivost při spolehlivosti 90 % přepočtená na hodiny
n	[min ⁻¹]	Rychlost otáček
P	[kN]	Dynamické zatížení ložiska
p	[-]	Mocnitel
R_a	[μm]	Střední aritmetická úchylka povrchu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
RMS	[mV]	Efektivní hodnota signálu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Znázornění axiálního ložiska [2].....	16
obr. 2-2	Šíření trhliny materiálem [8]	19
obr. 2-3	Průběh dynamického zatížení ložiska v radiálním a axiálním směru [9]	20
obr. 2-4	Výsledný povrch drážky (a – statické zatížení, b – dynamické zatížení).....	20
obr. 2-5	Nestacionární podmínky při simulaci: (a) Radiální síla, (b) Rychlost otáčení hřídele [10]	21
obr. 2-6	Časový průběh redukovaného napětí [10]	21
obr. 2-7	Průběh experimentů při zatížení externí silou 15 kN a 29 kN [12]	25
obr. 2-8	Zjednodušené schéma principu akustické emise [16]	27
obr. 2-9	Schéma přenosové trasy akustické emise [17]	29
obr. 2-10	Praskavý signál [14]	29
obr. 2-11	Spojité signál [14]	29
obr. 2-12	Signál akustické emise při proměnlivém zatížení (konstantní otáčky 3000 min ⁻¹) [20].....	31
obr. 2-13	Procesní mapa proměnlivého zatížení [20]	32
obr. 2-14	Signál akustické emise při proměnlivých otáčkách (zatížení 4,8 kN) [20].....	32
obr. 2-15	Použité testovací zařízení [21]	33
obr. 2-16	Zkušební vzorek [21]	34
obr. 2-17	Průběh experimentálního ověření ložiskového kroužku při zatížení 50kN [21]..	34
obr. 2-18	Zkušební stanice (frézka Bridgeport) [22]	35
obr. 2-19	Energie signálu AE vs. čas [22]	36
obr. 2-20	Průběh signálu AE při testu ložiskového materiálu pro zatížení: (a) 4000 N, (b) 2660 N [23]	36
obr. 2-21	Záznam zkoušky 5000/4500 MPa (změna po 10 min) [24].....	37
obr. 2-22	Průběh poškození ložiska a jeho možnosti identifikace [25]	38
obr. 4-1	Schéma průběhu řešení DP	42
obr. 4-2	Zkušební zařízení AXMAT [14].....	43
obr. 4-3	Zkušební zařízení AXMAT (úplně vpravo hydraulická varianta)	44

obr. 4-4	Prostředí softwaru pro ovládání stanic AXMAT.....	45
obr. 4-5	Geometrie zkušební vzorku [14]	46
obr. 4-6	Mikrostruktura materiálu před zakalením (vlevo), po zakalení (vpravo) [31].	47
obr. 4-7	Poloha jednotlivých vpichů pro určení tvrdosti	48
obr. 4-8	Ukázka změny mikrotvrdosti zkušební vzorku	48
obr. 4-9	Struktura materiálu oceli 100Cr6.....	49
obr. 4-10	Systém Dakel XEDO	50
obr. 4-11	Prostředí softwaru Deamon	51
obr. 4-12	Snímač Dakel MDK-13 [32]	52
obr. 4-13	Předzesilovač Dakel [32]	52
obr. 4-14	„Pen-test“ [27].....	53
obr. 4-15	Schéma uspořádání měřícího řetězce	54
obr. 4-16	Průběh smykového napětí v kontaktu kulička-vzorek.....	55
obr. 4-17	Průběh smykového napětí v kontaktu kulička-ložiskový kroužek	56
obr. 5-1	Průběh zatížení s jednou skokovou změnou zatížení.....	59
obr. 5-2	Cyklus zatížení s opakovanou změnou zatížení.....	59
obr. 5-3	Průběh zkoušky trvanlivosti při statickém zatížení (vzorek – S1).....	60
obr. 5-4	Povrch zkušební vzorku S1 po zkoušce	61
obr. 5-5	3D mapa defektu na vzorku S1 (zvětšeno 250x).....	61
obr. 5-6	Příčný řez oběžnou drahou	62
obr. 5-7	Weibullovo rozdělení trvanlivostí oceli 100Cr6 při statickém zatížení.....	63
obr. 5-8	Průběh signálu AE vzorku J4 s jednou skokovou změnou	64
obr. 5-9	Vzorek J4 po zkoušce trvanlivosti	64
obr. 5-10	3D mapa defektu 1 na vzorku J4 (zvětšeno 250x)	65
obr. 5-11	Weibullovo rozdělení trvanlivostí materiálových vzorků při jedné změně zatížení	66
obr. 5-12	Průběh teploty během experimentu vzorku D3	67
obr. 5-13	Nárůst vibrací na konci experimentu vzorku D3	67
obr. 5-14	Úplný záznam akustické emise ze zkoušky trvanlivosti vzorku D3	68
obr. 5-15	Povrch vzorků D3 – (a) a D18 – (b) po zkoušce	69

obr. 5-16	Weibullovo rozdělení trvanlivosti vzorků s opakovanou dynamickou změnou	70
obr. 5-17	Závislost otevření proporčního ventilu a tlaku v hydraulickém válci	71
obr. 5-18	Závislost mezi tlakem v hydraulickém válci a Hertzovým tlakem	71

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1	Vzorce pro výpočet střední velikosti zatížení a trvanlivosti proměnlivého zatížení [11]	22
tab. 2-2	Shrnutí výsledků [11].....	23
tab. 2-3	Velikost poškození povrchu spallingem [12]	24
tab. 2-4	Testovací zařízení bodového kontaktu [12], [14].....	26
tab. 2-5	Trvanlivost vzorků [22].....	35
tab. 4-1	Parametry zařízení AXMAT [14]	44
tab. 4-2	Technické parametry akcelerometru	45
tab. 4-3	Chemické složení dle normy [hm %] [30]	47
tab. 4-4	Technické parametry kanálových jednotek [32]	50
tab. 4-5	Technické parametry snímače Dakel MIDI [32].....	52
tab. 4-6	Technické parametry předzesilovače Dakel [32]	52
tab. 4-7	Parametry zkušebního uzlu	55
tab. 4-8	Kontakt kulička-zkušební vzorek	55
tab. 4-9	Kontakt kulička-ložiskový kroužek	55
tab. 5-1	Predikovaná trvanlivost L_{10h} zkušební vzorku	58
tab. 5-2	Měření trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při statickém zatížení	62
tab. 5-3	Získané trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při jedné změně zatížení	65
tab. 5-4	Získané trvanlivosti vzorků ložiskové oceli 100Cr6 při dynamické změně zatížení (opakovaná změna)	69
tab. 6-1	Odchylka teoretických základních trvanlivostí vůči statickému zatížení	73
tab. 6-2	Odchylka experimentálních základních trvanlivostí vůči statickému zatížení	74
tab. 6-3	Relativní odchylka experimentálně získaných trvanlivostí od teoretického předpokladu	74

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkresová dokumentace
Příloha 2	Fotodokumentace
Příloha 3	Publikační výstup